

# 五相容错双凸极无刷直流发电机研究

朱德明, 邱鑫, 王慧贞, 严仰光

(南京航空航天大学 航空电源航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 针对高可靠性应用场合, 提出一种五相 10/8 结构容错电励磁双凸极发电机的构成方案。在分析了该电机结构特点的基础上, 利用二维有限元电磁场分析软件对电机的静态特性和空载开路故障进行仿真。仿真结果表明: 该电机电动势宽度为 144 左右, 励磁绕组自感基本不受转子位置影响, 而电枢绕组的互感也远小于电枢绕组的自感。当一相或非相邻的两相发生开路故障时, 对输出电压的直流分量影响很小, 而当相邻的两相发生开路故障时, 对输出电压影响不可以忽略。

**关键词:** 电励磁双凸极发电机; 五相; 容错; 风力发电

中图分类号: TM353 文献标识码: A 文章编号: 1007-449X(2009)03-0327-05

## Research on five phase fault tolerant doubly salient electromagnetic generator

ZHU De-ming, QIU Xin, WANG Hui-zhen, YAN Yang-guang

(Aero-Power Sci-tech Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The objective of this paper is to present a novel five phase fault tolerant doubly salient electromagnetic generator (DSEG) for high reliability situations. The distinct structural features of the novel generator are introduced and a 2-D FEA model was also developed. Then the static characteristics and non-load open circuit faults of the generator were researched basic on the 2-D FEA model. The results show that the width of the phase EMF approaches 144 degrees, the rotor position has little effect on the self-inductance of field windings and the mutual inductances of phase winding are much lower than the self inductances of phase windings. If one phase winding or two non-adjacent phase winding open circuit faults occur, the generator can still supply the qualified power to the load. While two adjacent phase winding open circuit faults occurs, the influence to the output voltage can not be ignored.

**Key words:** doubly salient electromagnetic generator; five phase; fault tolerant; wind power

## 1 引 言

近年来航空航天、舰船、电动汽车和风力发电等领域的发展对电机系统可靠性提出越来越严格的要求<sup>[1-4]</sup>。余度电机和容错电机具有高可靠性, 成为

国内外学者关注的热点。

余度电机系统由多台互为备份的电机并联构成, 具有可靠性高的优点。但其绕组发生故障时, 需将余度电机系统中的故障电机切除, 电机功率密度低, 且需要余度控制器配合使用, 一定程度上增加了

收稿日期: 2008-09-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(“九七三”计划)(2007CB210302); 国家自然科学基金项目(50337030)

作者简介: 朱德明(1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为航空电源、电机设计与控制的研究;

邱鑫(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制的研究;

王慧贞(1964-), 女, 研究员, 研究方向为航空电源的研究;

严仰光(1935-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空电源、电机设计与控制的研究。

系统复杂性,降低了系统可靠性<sup>[5-7]</sup>。容错电机与余度电机不同,只需要一套控制器且一般为多相电机,发生一相或两相故障后仍能正常工作。

目前对容错电机的研究主要集中在电动场合。1988年美国 RICHTER E等首先提出容错电机的概念,并对开关磁阻电动机的容错能力进行了研究。随后,英国 MECROW B C和 HOWE D等在此基础上提出永磁交流容错电动机,并成功应用在飞机燃油系统和航空机电作动系统<sup>[1-3]</sup>。与常规电机相比,容错电动机具有以下特征: 电枢绕组为集中非叠绕组,非相邻的两个齿上套有绕组,同一槽中只有一相绕组,各相绕组之间电、磁和热隔离; 电机的相数至少为 4相; 设计合适的电枢绕组自感值,使相绕组短路电流低于额定值; 各相绕组采用独立变换器供电(一般采用全桥变换器),一相变换器故障后不会影响到其他相工作。因永磁容错交流电动机的相绕组自感值大,如果用作发电机,则电机外特性较软,使其在发电场合应用受到限制。

DSEG是在开关磁阻发电机的基础上发展起来的无刷直流发电机,具有结构简单、工作可靠和输出电压可调的优点。电枢绕组通过不控整流电路整流成直流电,无需位置传感器和有源功率变换器。DSEG的相绕组自感通常较大,绕组发生故障后,故障相的短路电流小,且故障相整流二极管自动截止。若工作在增磁发电方式,电枢绕组的电枢反应还有助于改善电机的外特性<sup>[6]</sup>,为构成无刷直流容错发电机创造了条件。本文任务主要是提出五相容错 DSEG电机结构,对其静态特性和空载相绕组开路故障进行分析。

## 2 五相容错 DSEG 结构

五相容错 DSEG电机的定子极数为 10,转子极数为 8,如图 1 所示。图中  $W_f$  代表励磁绕组,  $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$ 、 $W_D$  和  $W_E$  分别为五相电枢绕组, A、B、C、D、E、 $F_f$  分别代表五相定子极和容错极。

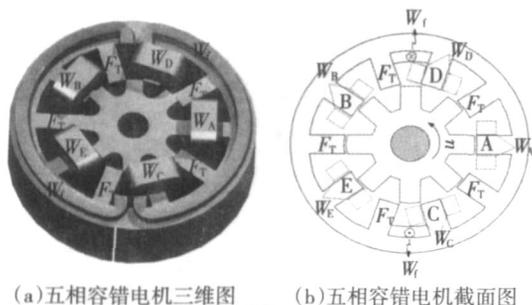


图 1 10/8 结构容错双凸极发电机结构

Fig 1 Structure of 10/8-pole fault tolerant DSEG

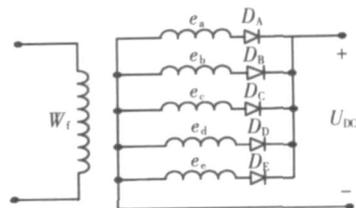


图 2 SRG 发电方式绕组接线图

Fig 2 The winding connection of SRG working mode

五相容错 DSEG的相定子极与容错极均匀分布在定子圆周上,非相邻的定子极为相定子极,相定子极之间被容错极隔开。励磁绕组  $W_f$  跨过 5 个定子极,分布在相对的两个槽中,五相集中非叠绕组套装在相定子极上,容错极上无绕组。为保证励磁磁路磁导不受转子位置的影响,定子极宽为定子极距的 1/2,转子极宽等于定子极宽。

由于同一槽中只有一相绕组,降低发生相间短路的概率,且故障相绕组大部分热量传给定子铁心,避免对正常相的热破坏,使各相绕组之间电和热隔离。DSEG的相绕组电流产生的磁通大部分从容错极闭合,相绕组之间的互感较小,减小了 DSEG故障相短路电流对其他相的影响。

## 3 静态特性分析

为检验无刷直流容错 DSEG结构的合理性,设计了一台 15kW,五相 10/8 结构容错 DSEG,主要参数如表 1 所示。

表 1 五相 10/8 结构容错 DSEG 主要参数

Table 1 Main parameters of the five phase fault tolerant DSEG

参数名称	参数值	参数名称	参数值
功率 P	15 kW	输出电压 $U_{dc}$	270 V
转速变化范围	6 000~12 000 r/min	定子内径 $D_i$	127.3 mm
转子外径 $D_r$	126.5 mm	定子极高	49.2 mm
铁心长度 $l_e$	55 mm	每极绕组匝数 W	100
励磁安匝 $F_f$	500 A·T	定子材料	DW470-50

### 3.1 气隙磁密

图 3(a)给出转子极与 A 相定子极重合时空载磁场分布图和气隙磁密波形。双凸极电机的极对数等于转子极数,其定子内表面圆周的电角度  $\alpha_{air}$  与机械角度  $\alpha_m$  的关系为

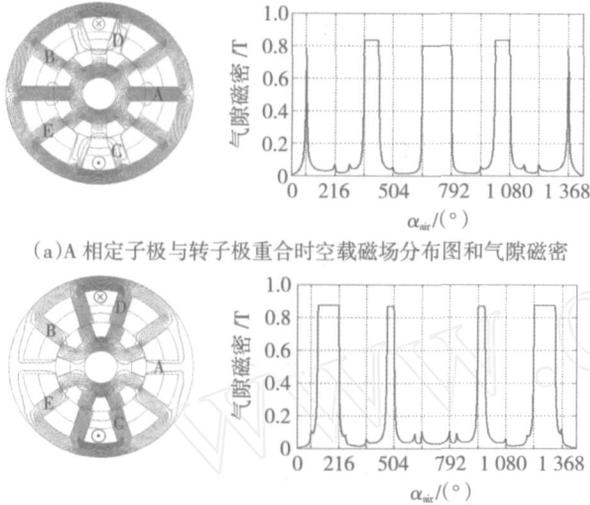
$$\alpha_{air} = p_r \alpha_m, \tag{1}$$

式中  $p_r$  为转子极数。由于定子极宽为定子极距的 1/2,则 10/8 结构的定子极占空间电角度为

$$(p_r \times 360^\circ) / 2p_s = 144^\circ$$

设  $\alpha_{air} = 0$  对应励磁绕组槽中心位置,则  $[72^\circ; 216^\circ]$  区间为 D 相定子极位置,  $[648^\circ; 792^\circ]$  区间为

A相定子极位置, [360°;504°]区间与 [936°;1080°]区间为容错极位置。由于转子极与 A相定子极完全重合,此时 A相极下气隙磁密为 0.800T,分布宽度达 144°。此时转子极与容错极重合一半,由于容错极励磁磁路比 A相定子极励磁磁路短,故容错极位置的气隙磁密最大值比 A相定子位置气隙磁密略高,为 0.825T,宽度为 72°。



(a) A相定子极与转子极重合时空载磁场分布图和气隙磁密  
(b) A相定子极与转子槽中心重合时空载磁场分布图和气隙磁密  
图 3 空载磁场分布图与气隙磁密图

Fig. 3 Non-load field distributions and flux density of airgap

图 3(b)给出转子槽中心线与 A相定子极重合时空载磁场分布图和气隙磁密波形。此时 A相极下气隙最大,气隙磁密最小为 0.027T。由于定转子极间的边缘效应存在,气隙磁密在 648 和 792 位置出现小的峰值。

3.2 磁链和电势

图 4给出转速为 12 000 r/min时电机相绕组空

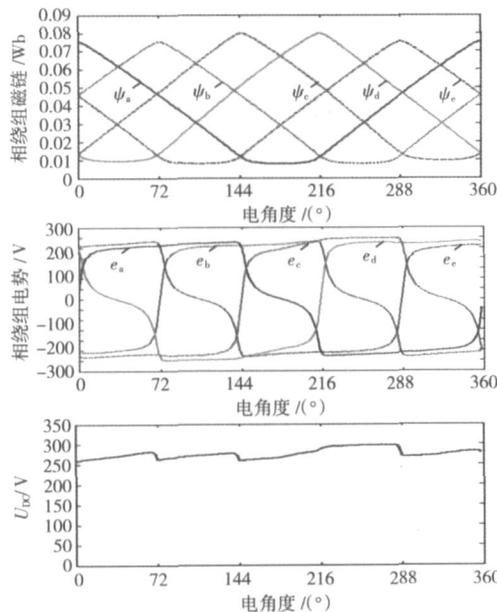


图 4 电枢绕组磁链与电势

Fig. 4 The flux linkage and EMF of phase windings

载磁链、感应电势以及整流输出电压  $U_{DC}$  波形。因气隙磁密大小基本不变,最大宽度为 144 电角度,则五相绕组空载磁链上升和下降区间也约等于 144 电角度。C、D 相励磁绕组的在铁心里的磁路长度比其他相短,其励磁磁路铁心部分磁导小,对应的磁链的最大值和最小值也比其他相绕组略大。

注意到相电势波形为不规则的方波,方波的平顶宽度约为 144°;且五相电机相邻两相之间的相位差为 72°,则任意时刻五相 DSEG 有两相绕组电势同时为高或低,互为备份向负载供电。

3.3 励磁绕组自感与定位力矩

由于定、转子极间存在边缘效应,使励磁磁路磁导不再随转子位置变化而保持恒定,从而导致 DSEG 的励磁绕组自感略有波动。图 5 给出励磁安匝为 500 A·T 时, DSEG 励磁绕组自感的仿真结果,自感波动的峰峰值为 0.9 mH,为平均值为 1.7%。从而说明了 DSEG 定子极宽的合理性。

励磁绕组电感的波动不仅会在励磁绕组中感应电势,影响励磁电流的控制,而且会引起气隙磁场能量的变化,产生定位力矩。图 6 分别给出采用虚位移法和麦克斯维张量法计算得到的定位力矩曲线,两者吻合较好。定位力矩脉动峰峰值为 0.55 N·m,为额定转矩的 3.84%。

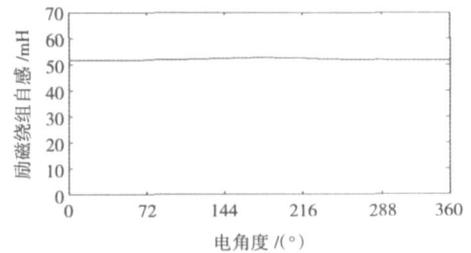


图 5 励磁绕组自感曲线

Fig. 5 The curve of the self-inductance of field windings

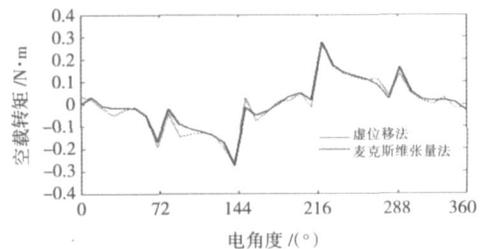


图 6 定位力矩曲线

Fig. 6 The curves of the cogging torque

3.4 自感与互感

相绕组自感曲线波形与相绕组磁链相似,其上升区间与下降区间为 144 左右,如图 7 所示。A 相自感曲线分别在 0 和 144 位置达到最大值 28.5 mH 和最小值 4 mH,其他相依次滞后 72°。

相绕组的互感分为两类,即相邻相绕组互感和非相邻相绕组互感,如图 8 所示。相邻相绕组互感的最大值为 4.55 mH,约为相绕组自感最大值的 15.6%。非相邻相绕组的互感最大值为 2.53 mH,为相绕组自感的 8.88%。

注意到 DSEG相绕组电势正方向的定义与励磁磁通方向满足右手定则,故在励磁绕组同侧的相绕组之间互感为负,异侧为正。

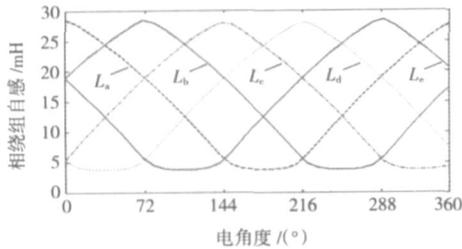
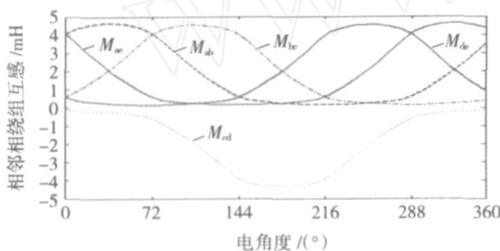
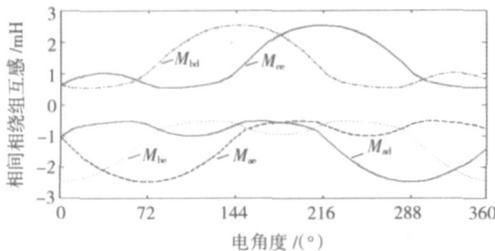


图 7 相绕组自感

Fig. 7 The curves of the self-inductance of phase windings



(a)相邻相绕组之间的互感曲线



(b)非相邻相绕组之间的互感曲线

图 8 相绕组互感

Fig. 8 The curves of the mutual-inductance of phase windings

### 4 开路故障容错性能分析

本节主要对不同转速下相绕组空载开路故障对整流输出电压的影响进行仿真分析。

#### 4.1 一相开路故障

图 9 给出转速分别为 6 000 r/min和 12 000 r/min 时 B 相发生开路故障后整流输出电压波形图。B 相绕组发生开路故障后,  $U_{DC}$  为 A 相、C 相、D 相和 E 相绕组整流输出电压。表 2 进一步给出了输出电压的直流分量和电压脉动值。无故障时,整流输出电压脉动的峰峰值分别占直流分量的 13.74% (高速)和 10.27% (低速), 远比三相 DSEG 低<sup>[15]</sup>。

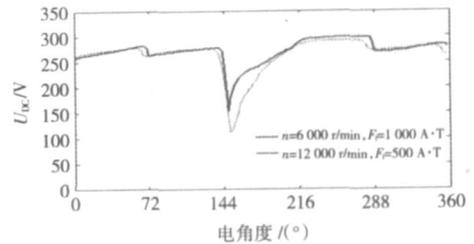


图 9 一相开路输出电压波形

Fig. 9 The output voltage of DSEG @ one phase open circuit

表 2 空载开路故障对输出电压影响

Table 2 Main parameters of the five phase fault tolerant DSEG

故障情况	$n=12\ 000\ \text{r/min}, F_f=500\ \text{A}\cdot\text{T}$			$n=6\ 000\ \text{r/min}, F_f=1\ 000\ \text{A}\cdot\text{T}$		
	直流分量/V	电压脉动峰峰值/V	百分比/%	直流分量/V	电压脉动峰峰值/V	百分比/%
无故障	276.66	38	13.74	275.55	28.3	10.27
一相开路故障	271.06	143	52.76	264.41	180	68.08
非相邻相开路故障	264.98	143	53.97	254.94	180	70.06
相邻相开路故障	221.55	298	134.51	214.29	290	135.33

当发生一相开路故障时,由于相绕组电势波形不是标准的 144 方波,导致整流输出电压在一个电周期里产生一个较大的电压脉动。转速为 12 000 r/min 电压脉动值为 143 V,比转速为 6 000 r/min 时低 37 V。与无故障相比,电机在高速和低速时输出电压直流分量分别降低了 2.02%和 4.04%。为输出合格的电能,除滤波电容设计需要满足电压的纹波要求之外,还需要适当调节励磁电流。

#### 4.2 两相开路故障

对多相电机而言,当一相绕组发生故障后,发生第二次故障的情况分为两种,即非相邻相绕组故障和相邻相绕组故障。这两种故障对输出电压的影响不同。

图 10 分别给出 B、D 相开路故障和 B、C 相开路故障时  $U_{DC}$  的波形。其中 B、D 相开路故障为非相邻相开路故障,  $U_{DC}$  的波形在一个电周期里有两个电压缺口,使电机直流分量在高速和低速时分别下降了 3.84%和 7.61%,适当提高励磁电流即可向负载提高合格电能。

B、C 相开路故障为相邻相故障,  $U_{DC}$  在一个电周期里有一个宽度接近 72 的缺口,其直流分量在高速和低速时分别下降了 19.92%和 22.34%,影响了对负载的供电质量。

由此可见,五相容错 DSEG 发生故障时,故障相的二极管不导通,  $U_{DC}$  由正常相整流输出,整个过程不需要控制器参与。一相和非相邻两相发生故障时,对空载输出电压  $U_{DC}$  的直流分量影响很小,输出电压品质基本不变。从而达到发生故障后仍能向负载提供合格的电能的容错能力。而相邻两相发生故

障时,对空载输出电压  $U_{DC}$  的直流分量影响较大。

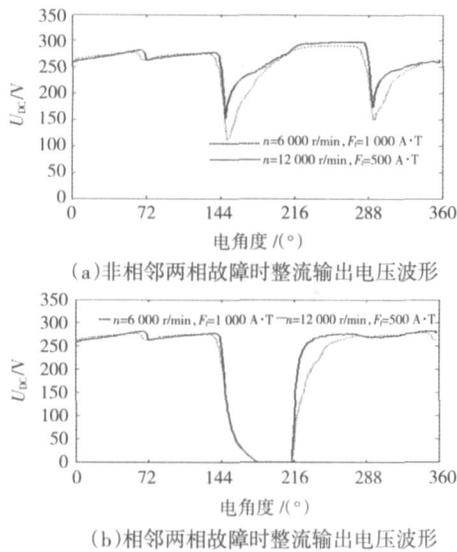


图 10 两相开路故障时输出电压波形

Fig 10 The output voltage of DSEG @ two phase open circuit

## 5 结论

本文研究了一种新颖的五相 10/8 结构容错电磁双凸极电机,介绍的样机的结构特点,建立了电机的二维有限元模型,分析了电机的静态特性和空载开路故障对整流输出电压的影响,得到以下结论:

1) 五相 10/8 结构容错 DSEG 的定子极宽为极距的 1/2 时,励磁绕组磁路磁导基本不受转子位置的影响。

2) 五相 10/8 结构容错 DSEG 的相邻相绕组的互感比相绕组自感小,非相邻相绕组的互感比相邻相绕组的互感小。本文的仿真结果表明,相邻相绕组的互感为相绕组自感的 15.6%,而非邻相绕组的互感为相绕组自感的 8.88%。

3) 五相 10/8 结构容错 DSEG 的电势宽度接近 144°;在无故障时,整流输出电压脉动比三相 DSEG 小。在发生一相或非相邻两相开路故障时,整流输出电压的直流分量下降较小,发生相邻两相开路故障时,对整流输出电压影响较大。

### 参考文献:

- [1] RICHTER E. High temperature switched reluctance motors and generators for future aircraft engine applications [J]. *Proceedings of the American control conference*, 1988: 1846 - 1851.
- [2] JACK A G, MECROW B C, HAYLOCK J A. A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high performance fault-tolerant operation [J]. *IEEE Trans Ind Appl*, 1996, 32: 889 - 895.
- [3] EDE J D, ATALLAH K, WANG J B, *et al* Modular fault tolerant permanent magnet brushless machine [J]. *Int Conf on Power Electronics, Machines and Drives*, 2002: 415 - 420.
- [4] CHAN C C, ZNANG R J, CHAU K T, *et al* A novel permanent magnet hybrid motor for electric vehicles [J]. *Proceedings of China International Conference on Electric Machines*, 1995: 618 - 623.
- [5] MICHAM A J, ANTONOPOULOS G. Favourable slot and pole number combinations for fault-tolerant PM machines [J]. *IEE Proc-Electr Power Appl*, 2004, 151 (5): 520 - 525.
- [6] DAI W L, WANG H Z, QIN H H, *et al* Research on switched reluctance generating mode of doubly salient electromagnetic generator [C] // *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008: 154 - 158.
- [7] FAN Y, CHAU K T. Design, modeling, and analysis of a brushless doubly fed doubly salient machine for electric vehicles [J]. *IEEE Trans Industry Appl*, 2008, 44 (3): 727 - 734.
- [8] FAN Y, CHAU K T, CHENG M. A new three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation [J]. *IEEE Trans Industry Appl*, 2006, 42: 53 - 60.
- [9] FAN Y, CHAU K T, NIU S X. Development of a New brushless doubly fed doubly salient machine for wind power generation [J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2006, 42 (10): 3455 - 3457.
- [10] 周波, 相蓉, 王川云. 电磁式双凸极电机电磁特性的理论分析 [J]. *航空学报*, 2003, 24 (4): 355 - 359.
- [11] ZHOU Bo, XIANG Rong, WANG Chuanyun. Theoretical analysis on the Electromagnetic characteristics for doubly salient electromagnetic machines [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2003, 24 (4): 355 - 359.
- [12] CHENG Ming, CHAU K T, CHAN C C, *et al* Nonlinear varying-network magnetic circuit analysis for doubly salient permanent magnet motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36 (1): 339 - 348.
- [13] ZHAO Wenxiang, CHENG Ming, ZHU Xiaoyong, *et al* Analysis of fault tolerant performance of a doubly salient permanent magnet motor drive using transient co-simulation method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55 (4): 1739 - 1748.
- [14] ZHANG Jianzhong, CHEN Zhe, CHENG Ming. Design and comparison of a novel stator interior permanent magnet generator for direct-drive wind turbines [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2007, 1 (4): 203 - 210.
- [15] CHENG Ming, FAN Ying, CHAU K T. Design and analysis of a novel stator-doubly-fed doubly salient motor for electric vehicles [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97 (10): 10Q508 - 1 - 3.
- [16] 王莉, 严仰光, 曹小庆, 等. 电磁式双凸极无刷直流发电机电压纹波分析 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2006, 38 (1): 47 - 51.
- [17] WANG Li, YAN Yangguang, CAO Xiaoqing, *et al* Analysis of DC output voltage ripple in Electromagnetic Doubly Salient Brushless DC Generator [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2006, 38 (1): 47 - 51.

(编辑:于智龙)