

# 双凸极起动/发电机系统一体化设计与实现

任海英, 周波

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

## Integral Design and Implementation of Doubly Salient Starter/Generator

REN Hai-ying, ZHOU Bo

(Key Laboratory of Aeronautical Power System, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** The starter/generator technology is an important developing direction of the electric aircraft system. Doubly salient electro-magnetic starter/generator (DSES/G) based on digital signal processing (DSP) control has good application prospect. The structure of the motor and the integral principle of starter/generator were analyzed. For decreasing bulk, weight and simplifying control circuit of the system, this article made integral design for main power converter, excitation power circuit and hardware and software circuit. It implemented full digital control of starting, starting/generating switch and generating. The experiment has validated feasibility of integral design scheme of starter/generator. It indicates that DSES/G can start reliably, switch from starting to generating is simple, generating voltage is steady and fault generating can be implemented.

**KEY WORDS:** doubly salient electro-magnetic starter/generator; integral design; full digital control; switch from starting to generating

**摘要:** 起动/发电技术是当今航空电气技术发展的重要方向, 基于 DSP 控制的电励磁双凸极起动/发电机系统具有良好的应用前景。分析了电机结构与起动/发电一体化工作原理。为了使系统的体积、重量减少, 使控制电路简化, 该文对主功率变换器、励磁功率电路和硬软件控制电路进行了一体化设计, 并以 DSP 芯片为基础, 实现了起动、起动/发电切换与发电工作的全数字控制。实验验证了起动/发电一体化设计方案的可行性, 表明电励磁双凸极起动/发电机系统能可靠起动, 起动/发电切换控制简单, 发电电压稳定且可实现故障发电。

**关键词:** 电励磁双凸极起动/发电机; 一体化设计; 全数字控制; 起动/发电切换

基金项目: 江苏省高技术项目(BG2004009); 江苏省自然科学基金(BK2003088); 教育部博士点基金(20020287020)。

## 0 引言

起动/发电机用于起动航空发动机和为飞机电气负载供电, 起动/发电技术是当今航空电气技术发展的重要方向<sup>[1]</sup>。

开关磁阻起动/发电机系统(SRS/G)在国内外已有相关研究, 其最重要的优点就是可靠性和容错性高。由于无永磁体且相与相间磁和电的相互独立性使电机的可靠性大大提高; 转子机械的整体性允许高速、高功率密度运行。SRS/G 高温、高速度运行环境下可直接带动飞机发动机, 消除了飞行器上的齿轮箱和辅助液压系统<sup>[1-3]</sup>。

20 世纪 90 年代, T.A.Lipo 教授发明了结构与开关磁阻电机相似的永磁双凸极电机<sup>[4-6]</sup>, 南京航空航天大学在此基础上提出了电励磁双凸极电机(DSEM)。通过对电励磁双凸极电机进行性能测试与控制系统设计, 这种电机可构成起动/发电机系统。电励磁双凸极起动/发电机具有开关磁阻起动/发电机的优点, 且发电控制更为简单方便, 无需位置传感器, 直接控制励磁电流即可控制输出电压, 发电性能优良。这些优点已由本课题组研制成功的车用 30kW 双凸极高压直流发电系统得到了验证。

目前, 国、内外对开关磁阻起动/发电机研究较多, 而对于双凸极电机进行起动/发电一体化设计的研究刚刚起步。本文主要对电励磁双凸极起动/发电机(DSES/G)的一体化设计和全数字控制技术进行研究, 设计了双凸极起动/发电机原理样机, 并进行了实验验证。

## 1 双凸极起动/发电机系统的一体化设计

### 1.1 双凸极电机结构及起动/发电一体化原理

图 1 为 6/4 极电励磁双凸极起动/发电机空载时

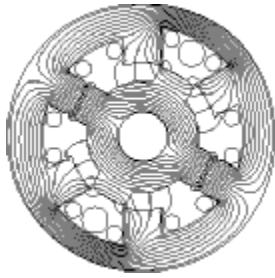


图1 6/4极起动/发电机空载时磁场分布图  
Fig.1 Distribution map of the magnetic field being unloaded for 6/4 DSES/G

的磁场分布图,电机定、转子均为凸极齿槽结构,定子上装有集中励磁绕组和电枢绕组,转子上无绕组。定子极弧设计为定子齿距的一半<sup>[7]</sup>。

由图1可知,电机励磁绕组中通过一定电流时,将在电机中产生一定的磁场分布,磁通经过定子轭部、定子齿部、空气隙、转子齿部、转子轭部形成闭合回路。若按照一定的导通顺序给电机三相绕组通电,可使电机产生稳定的转矩,从而连续旋转。若外加机械力使电机转子按一定方向旋转,各相电枢绕组匝链的磁链将随着转子位置改变而变化,从而在各相电枢绕组中产生感应电势,当电机带载运行时,将向负载输出电能<sup>[8]</sup>。因此双凸极电机既可用于电动也可用于发电。如果将原动机与双凸极电机同轴安装,先由双凸极电机作为起动机带动原动机旋转,达到发电临界转速后,反过来原动机拖动双凸极电机,双凸极电机获得动能向负载供电,故双凸极电机可实现起动/发电机一体化<sup>[9-10]</sup>。

1.2 起动/发电机系统反电势分析

电励磁双凸极电机相绕组的相电压方程为<sup>[11]</sup>

$$U_p = \pm i_p R_p + w \frac{\partial y_p}{\partial q} \tag{1}$$

式中:  $U_p$ 、 $R_p$ 、 $i_p$ 、 $y_p$ 、 $q$ 、 $w$  分别为电机  $p$  相绕组的端电压、电阻、电流、磁链、转子位置角与角速度;“±” 分别对应起动/发电机的起动状态和发电状态。

将  $w \frac{\partial y_p}{\partial q}$  展开, 可得起动状态的电压方程为

$$U_p = i_p R_p + L_p(q) \frac{di_p}{dt} + e_{pe} \pm e_{pr} \tag{2}$$

$$e_{pr} = i_p \frac{dL_p(q)}{dq} w \tag{3}$$

$$e_{pe} = i_f \frac{dL_{pf}(q)}{dq} w \tag{4}$$

式中:  $i_f$ 、 $L_p$ 、 $L_{pf}$  为励磁电流、 $p$  相绕组自感、绕组与励磁绕组的互感;  $e_p = e_{pe} + e_{pr}$  为电机反电势;  $e_{pr}$ 、 $e_{pe}$  分别为反电势的磁阻分量与励磁分量; 式(2)

中“±” 分别对应起动状态电感上升区间和下降区间的磁阻反电势。

图2(a)、(b)分别为分段线性电感模型下<sup>[8]</sup>, 起动和发电运行时电励磁双凸极起动/发电机的等效电路图。起动运行时, 在电感上升区间通正电,  $i_p e_{pr}$  为正; 电感下降区间通负电,  $i_p e_{pr}$  为负。  $i_p e_{pr}$  在电感上升和下降区间大小相等, 方向相反, 在一个周期中平均值为零;  $i_p e_{pe}$  在电感上升、下降区间均为正, 电机从电源吸收功率。发电运行时, 外加机械力带动转子, 电机每相绕组匝链的磁链产生变化, 绕组产生感应电动势  $w \frac{\partial y_p}{\partial q}$ , 向外界供电。

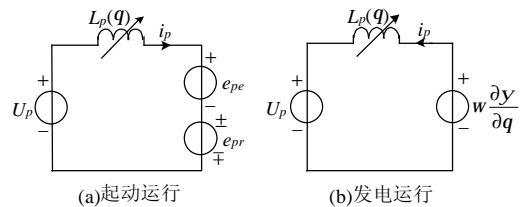


图2 起动/发电机等效电路图  
Fig.2 Equivalent circuit diagram of DSES/G

1.3 功率变换器一体化设计

在起动/发电机系统中, 对功率变换器进行一体化设计可有效地减少系统的体积和重量<sup>[2]</sup>。电励磁双凸极起动/发电机系统的功率变换器包括两部分, 分别为 IPM 全桥变换器和励磁功率电路, 如图3、4所示。DSES/G 实现起动与发电功能组合, 主要取决于全桥变换器是否具备能量双向变换功能和励磁功率电路是否起动、发电均受控, 即全桥变换器在起动状态作逆变器, 在发电状态作整流器; 励磁功率电路在起动状态恒流控制, 在发电状态励磁可调。

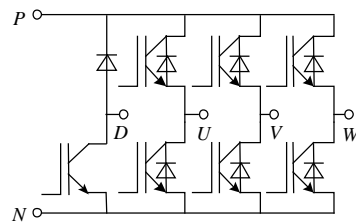


图3 IPM 全桥变换器  
Fig.3 Full-bridge converter for IPM

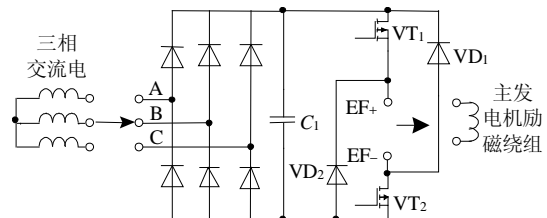


图4 励磁功率电路  
Fig.4 Power circuit of excitation

图 3 中主电路为三相全桥加一个泄放管。起动时, 起动电源给 IPM 供电, 控制功率管的开通与关断, 这时二极管作续流用, 使起动机带动原动机旋转。系统转入发电状态时, 封闭功率管的驱动信号, 全桥变换器作为整流桥工作, 电机发出的三相交流电经整流后输出直流电。图 4 中励磁功率电路由三相整流电路和不对称半桥电路组成, 系统起动运行时,  $VT_1$ 、 $VT_2$  功率管均开通, 励磁恒流供电; 发电运行时, 由  $VT_1$ 、 $VT_2$ 、 $VD_1$  和  $VD_2$  对励磁电流进行控制, 以实现调压。

双凸极电机功率变换器参数一体化设计的关键是起动与发电额定参数的有效、合理匹配。起动阶段采用电流斩波实现恒转矩控制, 限制峰值起动转矩。起动状态的最严酷工况发生于恒转矩控制时输出最大起动功率。

$$M_{Dmax} \geq 1.2M_p \quad (5)$$

$$P_{Omax} = \frac{\pi M_{Dmax} n_1}{30 \times 1000} = \frac{M_{Dmax} n_1}{9549} \text{ kW} \quad (6)$$

式中:  $M_{Dmax}$  为峰值起动转矩;  $P_{Omax}$  为起动时最大输出功率;  $M_p$  为原动机的最大阻转矩;  $n_1$  为恒转矩控制的最高转速。

双凸极起动/发电机系统的起动转矩应大于原动机阻转矩, 原动机才能可靠起动。转速小于  $n_1$  阶段起动机恒转矩控制,  $n_1$  后恒功率控制, 故  $n_1$  为起动最大输出功率转速。

发电状态的最严酷工况是发电状态的过载时刻, 此时所对应的电流决定了全桥变换器二极管的连续电流定额。

$$P_c = \frac{2\pi M_{Dmax} n_s}{1.5 \times 60 \times 1000} = \frac{M_{Dmax} n_s}{14324} \text{ kV} \cdot \text{A} \quad (7)$$

式中:  $P_c$  为起动/发电系统容量;  $n_s$  为原动机怠速, 式(7)为考虑 1.5 倍过载时的情况。

起动/发电系统容量即发电状态的额定容量, 起动和发电两种严酷工况的统一就是系统额定参数匹配的基础。

对励磁功率电路中的不对称半桥电路而言, 起动阶段采用恒流控制时, 工作状态稳定。但发电调励磁阶段存在两个最严酷工况时刻: 一是最低发电转速时发出额定电压、额定功率, 此时要达到相同的功率需要输出的励磁电流最大; 二是发电状态的最大过载时刻。根据系统不同要求, 取此两个时刻中励磁电流最大者来设计励磁功率电路  $VT_1$ 、 $VT_2$ 、 $VD_1$ 、 $VD_2$  的参数。故设计好发电时的额定参数、最低发电转速、过载要求, 即可实现对励磁功率电

路的设计。

#### 1.4 控制器一体化设计

图 5 为电励磁双凸极起动/发电机系统框图, 该系统主要由原动机、电励磁双凸极起动/发电机、位置传感器、起动/发电切换继电器、IPM 电路、励磁功率电路、DSP 主控制器及外围调理电路组成。系统中 DSES/G、位置传感器以及原动机三者同轴设置, IPM 主功率变换器是三相电压源逆变器。反馈信号(如电压、电流和位置信号)由 DSP 识别<sup>[12]</sup>, DSP 基于反馈信息控制起动和发电运行。

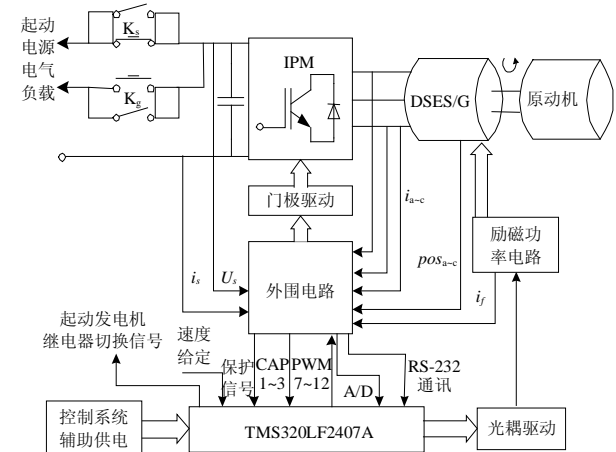


图 5 起动/发电机系统框图

Fig. 5 Systematic block diagram of DSES/G

将 DSP 与继电器配合实现控制器一体化设计, 使起动、发电状态自然过渡。在初始状态, 起动电源接继电器常闭触点, 电气负载接继电器常开触点。起动时, 由 DSP 得到全桥变换器功率管的控制信号, 使电机起动。起动发电状态的转换通过 DSP 测试转速切换点来实现, 当测出转速达到转换临界点时, 使控制起动电源的继电器断开, 同时使控制电气负载的继电器接通。发电时, 由 DSP 得到励磁功率电路功率管的控制信号, 实现调励磁、调压。

## 2 起动/发电机系统的全数字控制

### 2.1 起动数字控制

电励磁双凸极起动/发电机系统采用全数字控制, 所有功能均通过 DSP 算法处理来实现, 主要包括: 起动瞬时电流调节、起动换相控制及 PWM 脉冲信号输出、起动/发电切换继电器控制、发电电压调节、系统软件保护、延时功能、串行通信以及 LED 显示等。

双凸极电机起动运行时, 电流控制尤为重要。电流控制主要有三种方式: 平均电流或瞬时电流 PI 控制、瞬时电流跟踪控制和电流滞环斩波控制。

对电流响应要求较高的场合不太适宜采用平均电流控制。双凸极电机是一个多变量、强耦合的非线性系统，电感随位置、电流大小变化而改变，电机电磁关系十分复杂。PI 调节控制是一种经典的主要针对线性系统的控制方式，对双凸极电机采用瞬时电流 PI 控制难以获得理想效果。瞬时电流跟踪控制比较简单，从控制效果来说，更能准确地实现电流目标值，斩波频率更高，有利于电机提高效率及降低噪声，故电机起动采用瞬时电流跟踪控制。

电机电流为双极性电流，而 DSP 的 AD 转换模块要求输入 0~3.3V 的单极性信号。将具有正、负极性的电流反馈信号经过外部调制处理，转换为单极性电压信号送至 DSP 的 A/D 采样口。电流检测每 50μs 一次，采样频率为 20kHz，与 PWM 同频率。

DSP 的 PWM 脉冲输出有三种切换方式：计数器为零时切换、计数器周期匹配时切换、立即进行切换。当比较寄存器的值与计数器的值相等时，PWM 脉冲才翻转，上述三种切换方式均可能存在翻转时刻与换相时刻不等的情况，使 PWM 脉冲信号间的切换存在延时，导致形成换相死区，使换相不准确，造成电流波动，影响系统起动的稳定性和可靠性。为消除换相死区，在产生换相信号时，利用控制寄存器将 PWM 脉冲设置成强迫高电平或强迫低电平输出。换相完成后，再恢复为原 PWM 生成方式。采用此法，换相死区得到了有效的控制，使电流波形的稳定性和对称度均得到加强。

2.2 起动/发电数字控制切换

图 6 为电励磁双凸极起动/发电机系统数字控制切换软件流程图。系统通过 DSP 的捕获口得到电机位置信号，并在捕获中断中实时计算电机转速，判断电机转速是否超过发电状态的临界转速，判定是否转入起动换相控制。在 DSP 各中断响应子程序中，通过判断转速是否超过发电临界转速，转入相应的调压子程序、瞬时电流调节子程序、起动 AD 转换子程序或发电 AD 转换子程序等，使控制系统对相应的起动或发电状态进行实时准确的控制。

DSP 也需对励磁功率电路进行控制以实现起动、起动/发电切换、发电三种不同状态。起动时，DSP 分别输出 I/O 高电平信号给 VT<sub>1</sub>、VT<sub>2</sub> 管，使之一直处于导通状态，励磁电流恒定。起动/发电切换时，DSP 输出一个 I/O 高电平信号使 VT<sub>1</sub> 导通，输出 PWM 信号给 VT<sub>2</sub>，对 VT<sub>2</sub> 斩波控制，使励磁电路稳定可靠地实现调压。发电突卸负载时，分别输出 I/O 低电平信号给 VT<sub>1</sub>、VT<sub>2</sub> 管，使之关断，

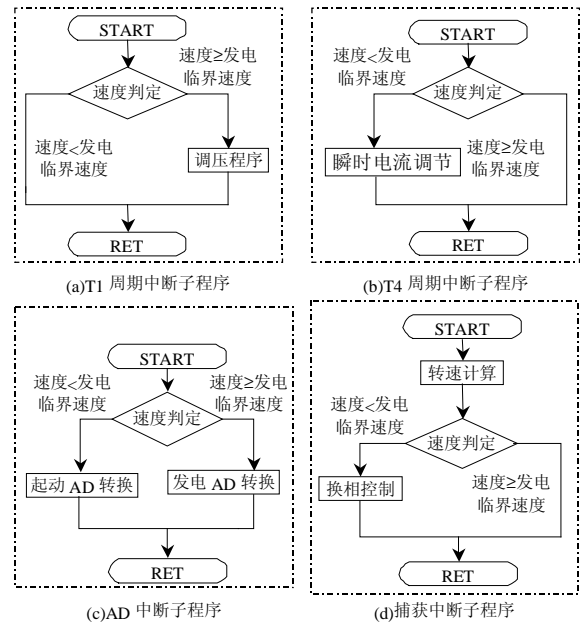


图 6 起动/发电机系统切换软件流程图

Fig. 6 Software flow chart of DSES/G switching  
使励磁电流迅速减小来减小输出电压的超调量。

2.3 发电数字控制

双凸极电机发电运行时，通过控制励磁电流对输出电压进行控制，控制斩波管 VT<sub>2</sub> 占空比的方法有多种，主要有 PID 算法、瞬时控制算法、模糊算法和内模控制算法等。本系统采用改进的比例积分分离 PI 控制算法，具有稳态调节性能好、动态响应快的优点。

电机从起动状态转入发电状态时，由于短时间内系统输出有很大的偏差，会造成 PI 运算的积分积累，引起系统较大的超调，采用适当的 PI 算法可使系统的性能得到较大的改善<sup>[13]</sup>。改进的比例积分分离 PI 控制算法是将积分分离 PI、防积分饱和 PI、带死区控制的 PI<sup>[14]</sup>三种控制算法相结合。具体方法是：设  $e(k)$  为第  $k$  次采样的电压偏差值， $u(k)$  为电压环的输出，根据实际情况，设定阈值  $e > 0$ 、死区值  $e_0 > 0$ 、饱和和限制值  $u_{max}$ 。当  $|e(k)| \leq e_0$  时，输出值不变； $|e(k)| > e_0$  时，正常 P 或 PI 输出。当  $|e(k)| > e$  时，采用 P 控制，可避免过大的超调，又使系统有较快的响应；当  $|e(k)| \leq e$  时，采用 PI 控制，可保证系统的控制精度。当  $u(k) > u_{max}$  时，直接输出饱和值  $u_{max}$ ，当  $u(k) \leq -u_{max}$  时，输出饱和值  $-u_{max}$ 。式(8)为改进的比例积分分离的 PI 控制算法。

$$u(k) = \begin{cases} u(k-1) & (|e(k)| < e_0) \\ u(k-1) + k_p e(k) + k_i [e(k) - e(k-1)] & (e_0 \leq |e(k)| \leq e) \\ k_p e(k) & (|e(k)| > e) \end{cases} \quad (8)$$

### 3 系统试验

DSP 控制器采用 TI 公司最具代表性的运动控制芯片 TMS320LF2407A, 基于该芯片, 建立了 6/4 极电励磁双凸极起动/发电机系统的数字控制试验平台, 起动电源与发电电压均为航空电气标准电压 28V, 起动/发电切换转速为 4000r/min, 全桥变换器选用三菱智能功率模块 IPM。基于上述平台, 模拟航空应用的起动/发电机系统, 进行了起动测试、起动/发电切换测试与发电测试。

图 7(a)为电机起动时, A 相电流与 IPM 下管驱动信号波形, 这时励磁电流固定, 控制器采用瞬时电流控制, A 相电流为 10A, IPM 功率管驱动信号高电平为 15V。

图 7(b)为起动/发电切换时, 转速与母线电压波形, 采用频压转换模块对转速进行测试, 电机切换转速为 4000 r/min, 发电稳定转速为 6000 r/min。系

统起动控制性能良好, 软件设计能够有效控制继电器切换。切换到发电状态后, 输出电压很快稳定在 28V。图 7(c)为起动/发电切换时, 励磁电流与母线电流波形, 起动电源和发电输出电压均为 28V, 起动状态的恒定励磁电流与发电状态的励磁电流值差别不大, 起动/发电切换时, 励磁电流能够迅速从起动时的恒流状态转化到发电的调节状态, 对发电机进行调压。电机起动时的母线电流较大, 使电机能够快速可靠地起动, 发电时母线电流与起动时输出电流方向相反。

图 8(a)、(b)分别为发电突加负载与突卸负载时瞬变输出电压与励磁电流波形, 当系统加、卸载时, 励磁功率电路可以迅速调节励磁电流使输出电压尽快稳定在给定值附近, 电压脉动较小。图 8(c)为发电时一相绕组断开后恢复的输出电压与励磁电流调节波形, 系统处于故障条件下仍能正常发电。

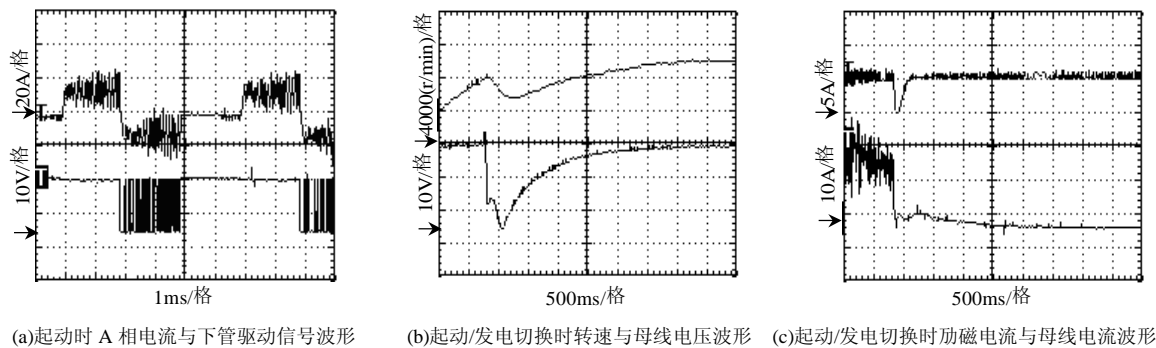


图 7 起动与起动/发电切换时实验波形

Fig.7 Experiment waveform for starting and switching between starting and generating of DSEG

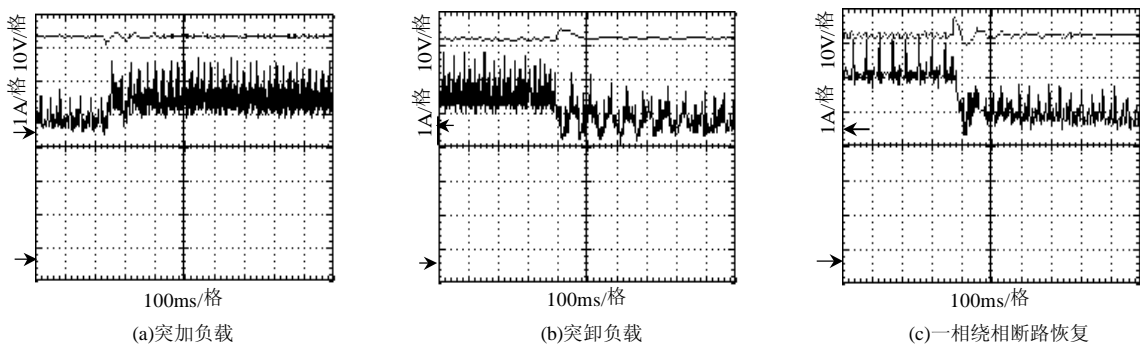


图 8 发电时输出电压与励磁电流实验波形

Fig.8 Experiment waveform for output voltage and excitation current while generating

### 4 结论

(1) 分析了电励磁双凸极电机独特的结构、起动与发电状态的反电势, 说明易于对其实现起动/发电一体化设计。

(2) 进行了起动/发电机功率变换器一体化与控制器一体化设计, 开发出一套硬件一体化设计方案。

(3) 基于 DSP 数字控制技术, 起动控制采用瞬时电流控制方法, 起动转入发电状态采用继电器进行切换, 发电采用 PI 控制算法进行调压。实验验证了起动/发电机系统设计方案的可行性。

### 参考文献

[1] Elbuluk, M E, Kankam M D. Potential starter/generator technologies

- for future aerospace applications[J]. IEEE Aerospace and Electrical System Magazine, 1996, 11(10): 17-24.
- [2] Fahimi B. On the suitability of switched reluctance drives for starter/generator application[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Birmingham, England, 2002.
- [3] 任贵勇, 王常虹, 马广程, 等. 开关磁阻电机的发电运行及其数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 29-32.  
Ren Guiyong, Wang Changhong, Ma Guangcheng *et al.* The study of SRM operating as generator and its digital simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 29-32(in Chinese).
- [4] Liao Y F, Liang F, Lipo T A. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure[J]. IEEE Trans. on Ind. Applicat., 1995, 31(5): 1069-1078.
- [5] 程明, 周波, 黄秀留. 双凸极变速永磁电机的变结构等效磁路模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 23-28.  
Cheng Ming, Zhou E, Huang Xiuli. Variable structure equivalent magnetic circuit modeling for doubly salient permanent magnet machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 23-38(in Chinese).
- [6] 李永斌, 江建中, 邹国棠. 新型定子双馈双凸极永磁电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 119-123.  
Li Yongbin, Jiang Jianzhong, Zou Guotang. Study on a novel doubly salient permanent-magnet machine with the doubly-fed stator [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 119-123(in Chinese).
- [7] 周波, 王川云, 相蓉, 等. 电励磁双凸极电机电磁特性的理论分析[J]. 航空学报, 2003, 24(4): 354-359.  
Zhou Bo, Wang Chuanyun, Xiang Rong, *et al.* Theoretical analysis on the electro-magnetic characteristics for doubly salient electro-magnetic machine[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 354-359(in Chinese).
- [8] 王莉, 孟小利, 曹小庆, 等. 电励磁双凸极发电机的非线性模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 137-143.  
Wang li, Meng Xiaoli, Cao Xiaoqing, *et al.* Nonlinear modeling and analysis of fielding-winding doubly salient generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 137-143(in Chinese).
- [9] Liu Jingbo, Hu Jiangang, Xu Longya. Design and control of a kilo-amp DC/AC inverter for integrated starter-generator(ISG) application[C]. IEEE Industry Application Conference, Seattle, Washington, USA, 2004.
- [10] Torrey D A. Switched reluctance generators and their control[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2002, 49(1): 3-14.
- [11] 周波, 任立立, 韦海荣, 等. 基于等效电感方法的电磁式双凸极电机系统简化控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 109-114.  
Zhou Bo, Ren Lili, Wei Hairong, *et al.* The simplified modeling for doubly salient electro-magnetic machines based on equivalent inductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 109-114.
- [12] Fahimi B, Ali Emadi, Raymond B. Sepe. A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 116-124.
- [13] 孙强, 程明, 周波, 等. 新型双凸极永磁电机调速系统的变参数PI控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 117-122.  
Sun Qiang, Cheng Ming, Zhou E, *et al.* Variable PI control of a novel doubly salient permanent magnet motor drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 117-122(in Chinese).
- [14] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

收稿日期: 2006-02-27。

作者简介:

任海英(1979—), 女, 硕士研究生, 研究方向为航空电源启动/发电机电系统、电机及其控制与功率变换技术, [renhaiying@126.com](mailto:renhaiying@126.com);

周波(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空电源系统、电机及其控制与功率变换技术。

(编辑 王剑乔)