

# 基于飞轮电池的应急备用电站充电控制系统研究

赵中玉<sup>1</sup>, 孙晓静<sup>2</sup>, 刘文莉<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学技术工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州电源车辆研究所有限公司, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州工业学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 提出了一种基于飞轮电池的应急备用电站系统, 采用双 PWM 变流器, 实现对负载的连续不间断供电。重点针对飞轮电池在系统中的应用特点, 提出了一种基于滑模变结构控制的快速充电控制策略: 通过对网侧变流器的控制, 实现单位功率因数运行; 结合趋近律法给出了飞轮电池滑模变结构速度控制器的设计方法, 并在同等条件下, 对滑模变结构控制器和 PI 控制器下的飞轮电池调速特性进行了仿真试验, 结果证明了滑模变结构控制器可有效地提高飞轮电池充电时的快速性和鲁棒性。

**关键词:** 飞轮电池; 备用电站; 滑模变结构控制; 快速性; 鲁棒性

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2015.02.004

[中图分类号] TM315 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2015)02-0012-03

## Research on the Charging Control System for the Flywheel Battery – based Emergency Standby Power Station

ZHAO Zhong-yu<sup>1</sup>, SUN Xiao-jing<sup>2</sup>, LIU Wen-Li<sup>3</sup>

(1. College Of Technology and Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. Lanzhou Power Supply Vehicle Institute Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730050, China;

3. Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** This paper presents an emergency standby power station system based on the flywheel battery, which adopts a dual PWM converter to realize uninterrupted power supply to the load. Perspective to the application characters of the flywheel battery in the system, it introduces a fast-charging control strategy on the basis of the sliding mode variable structure control (SMC). Control of the grid-side converter helps to achieve unity power factor operation. A method for designing the speed controller of the flywheel battery sliding mode variable structure is given in line with the reaching law. Under the same conditions, a simulation experiment is completed on the speed regulation characteristics of the flywheel battery under the SMC and PI controller. The test results prove that the sliding mode variable structure controller can effectively improve the rapidity and robustness of the charging of the flywheel battery.

**Keywords:** flywheel battery; standby power station; sliding mode variable structure control; rapidity; robustness

## 0 引言

目前应急备用电站发电技术已经相当成熟, 并已广泛应用, 但由于其实现市电到应急备用电站切换过程中不间断供电的是使用化学电池, 造成充电时间长、占据空间大、使用寿命短、对环境造成污染等问题。而飞轮电池克服了这些问题, 已经成为目前研究的热点<sup>[1-4]</sup>。

飞轮电池是一种机电能量转换装置, 其能量的转换主要是通过双向电动机/发电机、整流/逆变电力电子控制系统来实现的。其中双向电机可供选择的有五种<sup>[5]</sup>: 即感应电机、开关磁阻电机、“写极”电机、永磁无刷直流电机和永磁同步电机。目前, 国内外对飞轮电池的应用研究主要是针对感应电机和永磁无刷直流电机及其控制系统的研究<sup>[6-8]</sup>, 但由于前者转速不能太高; 转子转差损耗大; 而后者工作磁场是步进式旋转磁场, 很容易产生脉动, 同时伴有较大噪声。因此本文将采用转矩脉动小、噪声低, 即具有交流电机的结构简单、运行可靠, 又具有直流电机的运行效率高、无励磁损耗的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, 简称 PMSM) 来作为飞轮电池的驱动电机。电力电子装置

采用电路简单, 能实现能量双向流动的双 PWM 变流器方式。

由于 PMSM 是一个多变量、强耦合、非线性系统, 在实际应用中, 受外界干扰及内部扰动等不确定因素影响, 传统 PI 调节器很难满足高性能控制要求<sup>[9-10]</sup>。因此提出了一种基于滑模变结构的快速充电控制策略, 并通过 MATLAB/Simulink 仿真试验, 验证了该控制策略的正确性。

## 1 系统结构

基于飞轮电池的应急备用电站主要由市电电网、应急备用电站、飞轮电池及整流/逆变装置组成, 其系统结构如图 1 所示。

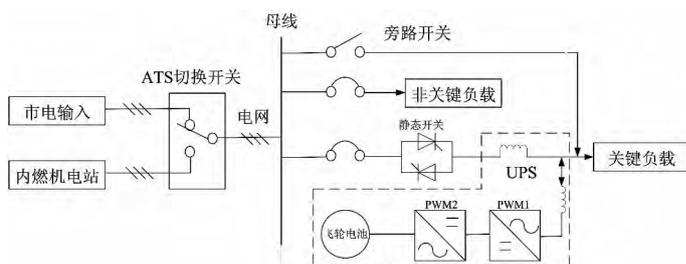


图 1 系统结构示意图

图中 ATS 的作用是保证电网在任何情况下只有一路交流电

定稿日期: 2014-06-16

输出;静态开关的作用是由电网供电旁路切换至飞轮电池供电。由于静态开关选用的是快速晶闸管,其接通时间只有微秒级,因此依靠这种技术,可以对负载实现由市电到应急备用电站转换时的不间断供电。

## 2 充电模式下电网侧 PWM 变流器控制

图2为连接在电网侧的三相电压型桥式 PWM 变流器结构图。其控制方式采用的是直接电流控制,以实现 PWM 整流电路工作时功率因数近似为 1 的控制;控制方法为滞环电流控制,其控制框图如图3所示。

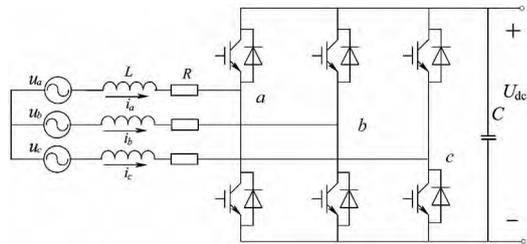


图2 电网侧 PWM 变流器结构图

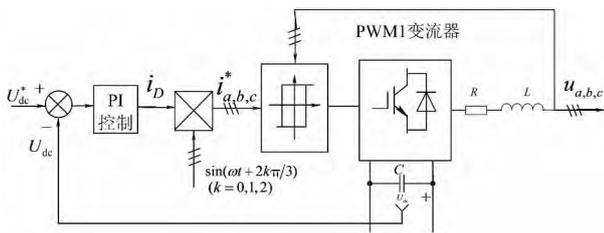


图3 控制系统结构框图

图3中的控制系统是一个双闭环系统,其外环为直流电压控制环,内环为交流电流控制环。由于 \$i\_{a,b,c}^\*\$ 分别是和各自的电源电压同相位,其幅值和反映负载电流大小的直流信号 \$i\_d\$ 成正比,因此可实现 PWM1 变流器的单位功率因数运行。

## 3 充电模式下飞轮电池侧 PWM 变流器控制

图4为连接在飞轮电池(永磁电机)侧的三相桥式 PWM 变流器。

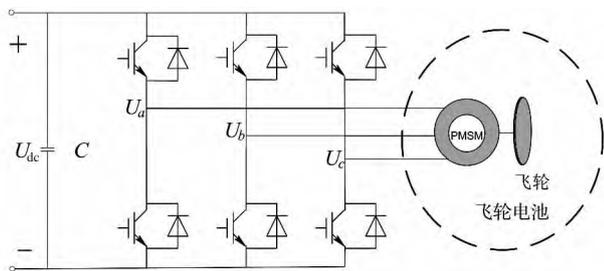


图4 飞轮电池侧 PWM 变流器结构图

### 3.1 永磁同步电机数学模型

永磁电机在 \$dq\$ 轴的数学模型主要由电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程组成。引入回转器理论,其在 \$dq\$ 轴下的简化等效电路如图5所示<sup>[11]</sup>。图中 \$p\_n\psi\_f\omega\_m = \omega\_r\psi\_f\$。

电路的电压、磁链及转矩方程如式(1)、(2)、(3):

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L p i_d - \omega_r L i_q \\ u_q = R_s i_q + L p i_q + \omega_r L i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

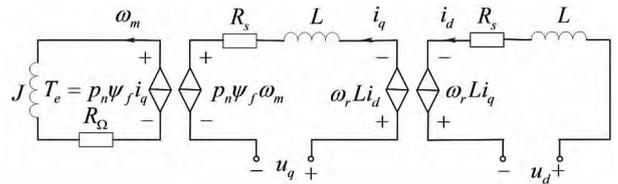


图5 飞轮电池充电时的等效电路图

$$T_e = p_n\psi_f i_q \quad (2)$$

$$T_e = J p \omega_m + R_\Omega \omega_m \quad (3)$$

这里 \$u\_d, u\_q, i\_d\$ 和 \$i\_q\$ 表示永磁同步电机在 \$q\$ 轴、\$d\$ 轴的电压和电流; \$L = L\_d = L\_q\$ 表示定子线圈在 \$d, q\$ 轴的电感; \$p\$ 是微分算子; \$R\_s\$ 是定子电阻; \$\omega\_r, \omega\_m\$ 是电磁和机械旋转速度; \$T\_e\$ 是电磁转矩; \$p\_n\$ 是极对数; \$\psi\_f\$ 是磁通; \$J\$ 是飞轮转动惯量; \$R\_\Omega\$ 是摩擦因数。

### 3.2 磁场定向矢量控制策略研究

飞轮电机侧 PWM 变流器采用的是磁场定向矢量控制方式<sup>[12]</sup>,即 \$i\_d = 0\$,如图6。此方式无电枢反应的去磁作用,输出力矩与定子电流成正比,控制最为简单。

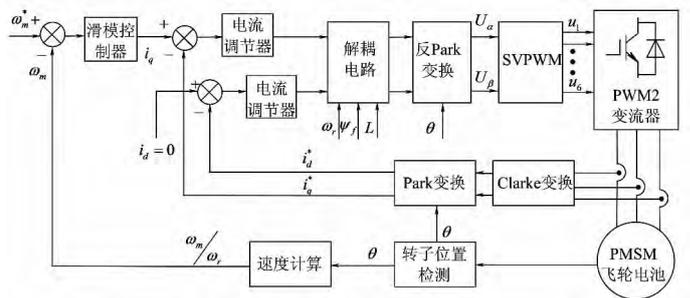


图6 飞轮电机侧 PWM 变流器控制策略

根据转子速度与给定速度比较后经由滑模控制器输出控制转矩的电流信号 \$i\_q, i\_d, i\_q\$ 经过电流 PI 调节器及电流内环的解耦电路(采用式(1))得到电压给定,经反 Park 变换产生 SVPWM 的控制电压 \$U\_\alpha\$ 和 \$U\_\beta\$。

### 3.3 滑模变结构控制器设计

#### (1) 控制器设计

取 PMSM 系统的状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_m^* - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (4)$$

结合式(2)和(3)得:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\dot{\omega}_m = -\frac{1}{J}(p_n\psi_f i_q - R_\Omega \omega_m) \\ \dot{x}_2 &= -\ddot{\omega}_m = -\frac{p_n\psi_f}{J} i_q - \frac{R_\Omega}{J} x_2 \end{aligned} \quad (5)$$

令 \$A = \frac{p\_n\psi\_f}{J}, \mu = i\_q\$, 可得系统的状态空间模型为:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -A \end{pmatrix} \mu \quad (6)$$

设计系统的滑模面 \$s\$ 为:

$$s = c_1 x_1 + c_2 x_2 \quad (7)$$

对 \$s\$ 求偏导有:

$$\dot{s} = c_1 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 = c_1 x_2 - c_2 A \dot{i}_q - \frac{c_2 R_\Omega}{J} x_2 \quad (8)$$

由指数趋近律法得:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (9)$$

式中  $\varepsilon > 0, k > 0$ 。

$$-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks = c_1 x_2 - c_2 A \dot{i}_q - \frac{c_2 R_\Omega}{J} x_2 \quad (10)$$

最后由式(10)得:

$$i_q = \frac{1}{c_2 A} \int (c_1 x_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks - \frac{c_2 R_\Omega}{J} x_2) dt \quad (11)$$

由式(11)可以看出,求解较为简单,易于软件编程实现。

### (2) 稳定性分析

利用 Lyapunov 稳定性理论分析。选择 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad s \neq 0 \quad (12)$$

对其求导得:

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks) \quad (13)$$

由于  $\varepsilon, k$  都是大于零的常数,保证了  $s$  与  $\dot{s}$  异号,满足了  $s \dot{s} < 0$  的稳定性条件,故保证了系统进入滑动模态。

系统一旦进入滑模面( $s=0$ ),即进入滑模控制状态。可得滑模控制下的运动微分方程:

$$c_1 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 = 0 \quad (14)$$

解此方程得:

$$x_1 = \omega_m^* - \omega_m = ce^{-(\frac{c_1}{c_2})t} \quad (15)$$

式中  $c$  为常数。当  $t \rightarrow \infty$  时,  $x_1$  沿指数趋于零,即能无超调的实现转速跟踪。此时,系统的品质完全由开关面的参数  $c$  决定,而与系统的参数及扰动无关,其稳定时间也只与  $c$  有关,因而具有很好的鲁棒性和快速性。

## 4 飞轮充电系统仿真

应用 MATLAB 仿真软件,在 Simulink 中建立了系统的仿真模型,并对其进行了仿真验证。

### 4.1 电网侧 PWM 变流器控制系统仿真

系统采用图 3 所示的控制方案。图 7 为直流侧电压仿真波形。

图 7 直流侧电压仿真波形

图 8 为电网侧电压/电流仿真波形。

图 7 中显示仿真开始后直流侧电压迅速上

图 8 交流侧电压/电流仿真波形

升到给定值,在 1 s 发生负载扰动时,由于电压闭环的作用,直流电压经过短暂下降后迅速恢复到给定值。图 8 为电网侧 PWM 变

流器输入电压和电流仿真波形,可看出网侧输入电压和输入电流基本保持在同一相位,系统工作在单位功率因数状态。负载增大时,电流的幅值迅速增大,系统的动态响应好。

### 4.2 飞轮电池侧 PWM 变流器控制系统仿真

系统采用如图 6 所示的控制方案。速度调节器采用滑模变结构控制器或 PI 控制器。图 9 和图 10 分别为 PI 控制和滑模变结构控制下的飞轮电池启动时的转速、转矩和三相电流响应波形,给定转速为 1500 r/min。

从仿真波形中可以看出,在 PI 作用下,系统启动存在超调,并有一定的调节时间,而在滑模变结构控制下,系统能够很快的抑制超调量,并达到转速给定,具有较强的快速性和鲁棒性。

## 5 结束语

本文针对飞轮电池在应急备用电站中要求快速充电的特点,采用直接电流控制实现了网侧 PWM 变流器的单位功率因数运行;同时设计了一种简单易行的变参数趋近律滑模速度控制器,并将其与传统 PI 控制器进行了仿真比较。研究表明,所设计的滑模变结构控制器算法简单,易于软件实现;系统响应快,对转速超调

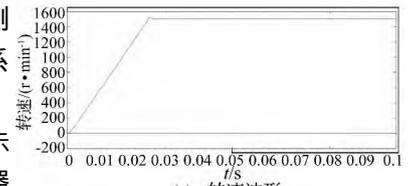
有明显的抑制;对系统内部参数摄动、外部干扰等不确定性具有较强的稳定鲁棒性和抗干扰性,满足飞轮电池快速充电的要求。

参考文献:

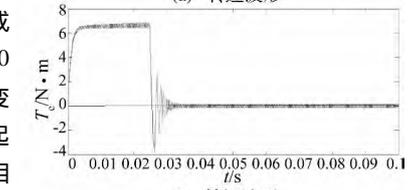
[1] GEORGE N PRODROMIDIS, FRANK A, COUTELIERIS. Simulations of economical and technical feasibility of battery and flywheel hybrid energy storage systems in autonomous projects [J]. Renewable Energy, 2011, 39(1): 149-153.

[2] ARGHANDEH R, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Flywheel energy storage systems for ride-through applications in a facility microgrid [C]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1955-1962.

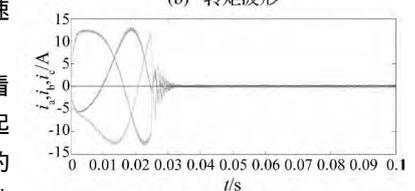
(下转第 17 页)



(a) 转速波形

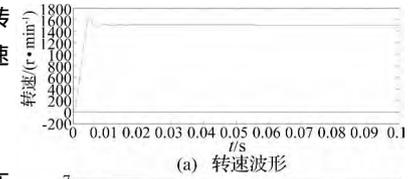


(b) 转矩波形

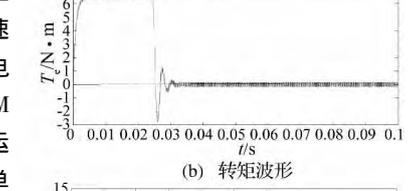


(c) 电机电流波形

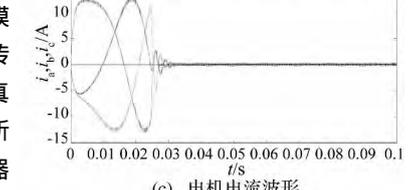
图 9 PI 控制



(a) 转速波形



(b) 转矩波形



(c) 电机电流波形

图 10 滑模变结构控制

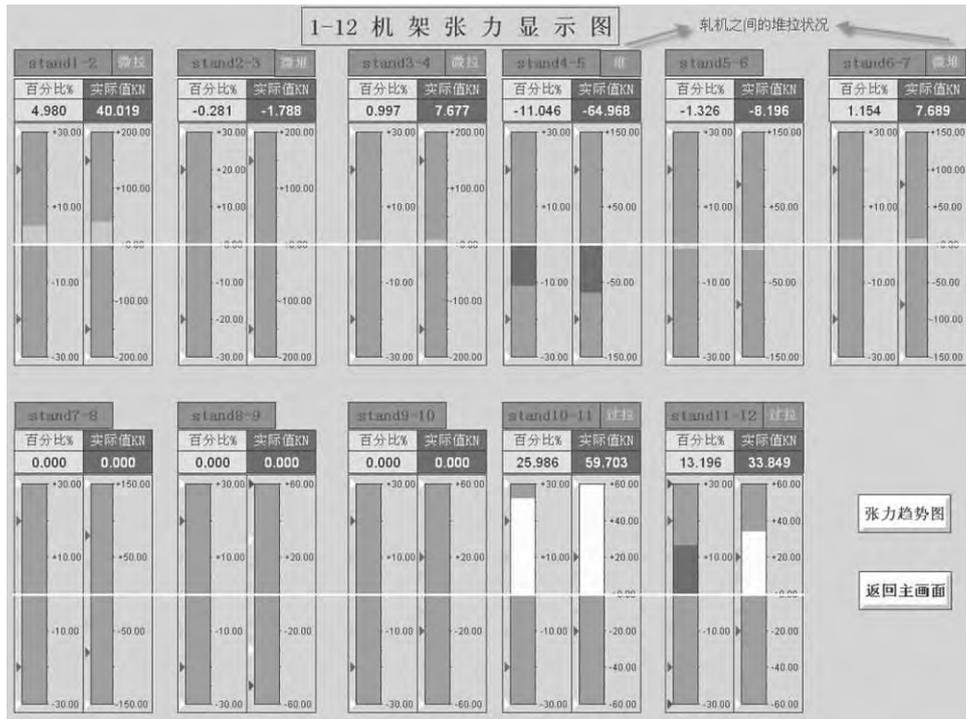


图3 粗中轧1-12机架张力显示图

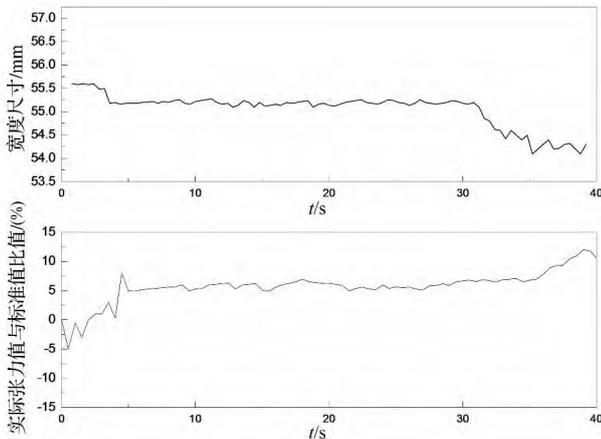


图4 张力与展宽方向尺寸对应关系图

#### 4 结束语

由以上论述可知 通过张力计算模型能快速准确的判断各架

次轧机之间的堆拉关系 较电流趋势图更为精确 并且可以定量的确定张力大小的特性。目前粗中轧各架次之间的张力能控制在 1 MPa ~ 2 MPa 之间。通过张力控制能预报成品通条尺寸情况 得到更高质量的产品 满足生产需求。

#### 参考文献:

- [1] 房世兴, 肖治维. 高速线材轧机装备技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [2] 丁修堃. 轧制过程自动化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [3] 郑申白, 曾庆亮, 李子林. 轧制过程自动化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [4] 张春. 西门子 STEP 7 编程语言与使用技巧 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 刘华波, 张赞宁. 基于 SIMATIC S7 的高级编程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [6] 齐克敏, 丁桦. 材料成型工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

【作者简介】袁浪 (1973 - ) 男, 江西安义人, 硕士, 工程师, 从事电气自动化技术工作。

(上接第 14 页)

- [3] BITTERLY J G. Flywheel technology past, present, and 21<sup>st</sup> century projections [J]. IEEE AES Systems Magazine, 1998, 13(8): 13 - 16.
- [4] CHEN JUNLING, JIANG XINJIAN, ZHU DONGQI, et al. A novel uninterruptible power supply using flywheel energy storage unit [C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2004, 3(8): 1180 - 1184.
- [5] 汤双清. 飞轮储能技术及应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [6] 陈峻岭, 姜新建, 朱东起, 等. 基于飞轮储能技术的新型 UPS 的研究 [J]. 清华大学学报, 2004, 44(10): 1321 - 1324.
- [7] 王健, 康龙云, 曹秉刚, 等. 新能源分布式发电系统的控制策略 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(7): 704 - 708.
- [8] KAIROUS D, WAMKEUE R. DFIG-based fuzzy sliding-mode control of WECS with a flywheel energy storage [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 93: 16 - 23.

- [9] 方斯琛, 周波, 黄佳佳, 等. 滑模控制永磁同步电动机调速系统 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 29 - 35.
- [10] 汪海波, 周波, 方斯琛. 永磁同步电机调速系统的滑模控制 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 71 - 76.
- [11] AKAGIANDH H. SATO: Advanced high-speed flywheel energy storage systems for pulsed power application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 17(1): 109 - 116.
- [12] 韩金刚, 陈昆明, 汤天浩. 半直驱永磁同步风力发电系统建模与电流解耦控制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 110 - 115.

【作者简介】赵中玉 (1980 - ) 男, 甘肃武威人, 工程师, 在读研究生; 研究方向: 主要从事控制理论与控制工程的研究。孙晓静 (1964 - ) 女, 山东威海人, 教授级高工, 博士; 研究方向: 主要从事电站控制系统的研究、设计工作。刘文莉 (1983 - ) 女, 安徽宿州人, 讲师, 研究生; 研究方向: 主要从事控制理论与控制工程的研究与应用。