

一种无速度传感器的双馈风力发电机 滞环矢量控制策略

张洋, 别朝红

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了简化双馈电机矢量控制系统所采用的基于电压正弦脉宽调制技术的控制方法,引入电流滞环跟踪脉宽调制技术,并针对所设计的滞环矢量控制系统设计了一种开环转速观测方案. 该方案直接利用转子电流在同步旋转坐标系中的参考值分量而避免了对实际电流分量的计算,从而简化了观测器设计并改善了观测效果. 简化后的控制系统不仅提高了响应速度而且不依赖电机参数,所设计的开环速度观测方案在一定程度上克服了传统开环速度观测的缺陷. 通过 PSCAD/EMT-DC 软件仿真验证了控制系统的有效性和转速观测方案的准确性.

关键词: 双馈异步电机; 矢量控制; 电流滞环脉宽调制; 开环转速观测

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)06-0109-05

Sensor-Less Hysteretic Vector Control of Doubly-Fed Machine for Wind Power Generators

ZHANG Yang, BIE Zhaozhong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As one of the advanced technologies, the variable speed constant frequency doubly-fed induction generation has been widely used nowadays and the usual vector control algorithms are mostly based on voltage sinusoidal pulse width modulation technology. In this paper the current hysteresis pulse width modulation technology is introduced to simplify the control system. An open-loop speed observer is designed according to the hysteresis vector control system. By using the rotor current reference components instead of the real current components, the observer design is simplified and observing effect is evidently improved. The dynamic respond performance becomes better in hysteresis vector control system, and the whole control process gets independent on any electric machine parameters. The proposed speed observer overcomes some of the disadvantages of the traditional open-loop speed observers. PSCAD/EMTDC simulation software is employed to test the proposed scheme, and the results demonstrate the efficiency of the control scheme as well as the speed observer.

Keywords: doubly-fed induction generator; vector control; current hysteresis pulse width modulation; open-loop speed observing

风力发电是当今发展最快的新能源技术. 目前的风电机组正向大型化、变桨距和变速恒频的方向发展,以此降低风力发电成本,同时提高风能利用率. 在此背景下变速恒频双馈异步电机(VSCF-DFIG)正在逐渐成为兆瓦级风电机组的主流机型,因此针对双馈风机控制技术的研究是十分必要的.

收稿日期: 2009-11-26. 作者简介: 张洋(1984—),男,硕士生;别朝红(联系人),女,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677050);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0660);中国电机工程学会电力青年科技创新资助项目.

双馈电机是一个非线性、多变量、强耦合系统^[1-2],矢量控制是通过坐标变换的方法,在新的坐标系中把异步电机等效为它励直流电动机,从而完成对异步电机的转矩和励磁分量独立控制的一种控制方案^[1,3-4].常规的DFIG矢量控制往往采用基于电压正弦脉宽调制(SPWM)技术的控制方法^[1],文献[4-5]的仿真研究均采用该控制技术.由于该控制技术需要电压前馈补偿,使控制系统较复杂,且影响了控制的动态响应速度.电流滞环技术^[1,6]的引入可以简化控制模型,且降低了控制系统对电机参数的依赖程度,通过PSCAD软件验证了控制策略的正确性和有效性.

在矢量控制中,转子的速度和位置信息是必不可少的.目前,国内外的双馈机组大多通过安装光电编码器等速度传感器来直接进行速度检测,但高精度的速度传感器存在着成本高、安装复杂、维护工作量大等缺陷^[4,7],因此无速度传感器控制成为目前DFIG控制系统设计的热门课题之一.速度观测器又可分为开环和闭环两种,文献[7-9]所设计的转速观测器属于闭环转速观测器,具有自校正能力,对电机参数具有较强的鲁棒性,但设计较复杂且与控制系统耦合度高.

本文针对电流滞环矢量控制系统的特点,提出了一种简便的开环速度观测方案,仿真结果验证了该方案的可行性.

1 滞环矢量控制策略

1.1 双馈电机的数学模型

由于本文采用矢量控制技术,即将三相静止坐标系下的电气量转化到两相旋转 dq 坐标系中,故以下直接给出双馈电机在两相旋转坐标系中的数学模型.

双馈电机定转子电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} &= R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} &= R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 为定子电压分量; u_{rd} 、 u_{rq} 为转子电压分量; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 为定子磁链分量; ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 为转子磁链分量; ω_1 为双馈异步电机同步旋转角速度; ω_r 为双馈电机转子角速度; R_s 、 R_r 为定转子电阻.

双馈电机磁链方程为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} &= L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} &= L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: i_{sd} 、 i_{sq} 为定子电流分量; i_{rd} 、 i_{rq} 为转子电流分量; L_m 为 dq 坐标系定子与转子同轴等效绕组的互感; L_s 为定子等效两相绕组的自感; L_r 为转子等效两相绕组的自感.

定子输出侧的有功、无功功率表达式如下

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{U}_s \dot{I}_s^*) \\ Q_1 &= \frac{3}{2} \operatorname{Im}(\dot{U}_s \dot{I}_s^*) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

1.2 基于电流滞环跟踪技术的矢量控制策略

在双馈电机矢量控制策略中,依据矢量定向的不同,又可分为基于定子磁链定向、基于定子电压定向、基于气隙磁场定向等形式^[3].本文采用定子磁链定向的矢量控制,将同步旋转坐标系的 d 轴与定子磁链矢量相重合,逆时针旋转 90° 的方向作为 q 轴的方向.

发电机稳态运行时,定子电阻上的压降很小,为简化模型,可以忽略不计定子电阻.此时,电机感应电动势 $\dot{E}_s$ 可以看做等于定子侧端电压 $\dot{U}_s$,由感应电势和磁通量的关系可知, $\dot{E}_s$ 超前 ψ_s 90° ,即可得到 $\psi_{ds} = |\psi_s|$, $\psi_{qs} = 0$, $u_{qs} = |u_s|$, $u_{ds} = 0$,并且

$$\left. \begin{aligned} i_{sq} &= -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ i_{sd} &= \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_{rd}) \\ \psi_s &= L_m i_{ms} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

定子电压方程的表达式可以简化为

$$u_{ds} = 0; u_{qs} = \omega_1 \psi_s = U_s \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(3),得

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= -\frac{3}{2} U_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_1 &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s (i_{ms} - i_{rd}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(6)可见,在定子磁链定向的同步旋转坐标系中,定子侧有功、无功功率分别与转子电流的转矩分量 i_{rq} 和励磁分量 i_{rd} 成线性关系.调节转子电流的两个分量,就可以实现双馈电机定子侧有功、无功功率的解耦控制.

对转子侧变流器采用电流滞环技术的基本原理为:控制电路产生具有期望幅值和频率的正弦参考

电流信号,将实际的电流信号与期望电流信号进行比较.当实际电流信号超过预先设定的滞环带上限时,变换器的上桥臂关断,下桥臂导通,使实际相电流下降;同理,当实际电流信号到达预先设定的滞环带下限时,变换器的下桥臂关断,上桥臂导通,使实际相电流上升^[3].

这样,通过上、下桥臂的轮流开关,强迫实际电流信号在一个滞环带内跟踪指令电流信号,达到对电流的控制.电流滞环技术的引入可以使转子侧实际电流直接跟踪控制所需的电流参考值 i_{rd}^* 、 i_{rq}^* ,而无需像传统方法那样通过电压补偿环节计算得到 u_{rd}^* 、 u_{rq}^* ,再由 SPWM 或 SVPWM 实现.

然而,电流滞环也有其固有的缺点,其开关频率受滞环宽度、电机定子漏感和反电动势等的制约,不是一个常数.变化的开关频率使得逆变桥输出频谱十分广泛,相应地滤波器优化设计困难.目前,该问题已经得到了广泛研究,文献[10]提出在滞环电流控制的基础上,引入频率反馈控制,改变环宽,使开关频率基本固定;文献[11]提出了一种动态计算平滑调节环宽的方法,实现了滞环电流控制开关频率恒定;文献[12]提出了恒频滞环控制系统的硬件实现方法,并利用 ICAP/4 软件进行仿真实验,结果证明了该方法的正确性.据悉,现在国内已有恒频电流滞环控制器的专利问世.

鉴于以上文献中对恒频电流滞环技术已有详细的原理介绍和仿真分析,本文的仿真暂时仍采用传统的固定环宽的电流滞环控制系统,系统控制框图如图 1 所示.图 1 中,转子电流控制由 i_{rd}^* 、 i_{rq}^* 两个控制通道组成,采用积分比例调节器 PI 控制.转子电流励磁分量 i_{rd}^* 由无功功率参考值 Q^* 求得.在转速控制环中,根据风能追踪的需要,计算得到转子机械角速度参考值 ω^* 并与实际转速值比较后,差值经 PI 调节器得到转子电流的转矩分量 i_{rq}^* .

由图 1 可见,使用电流滞环跟踪技术不仅可以

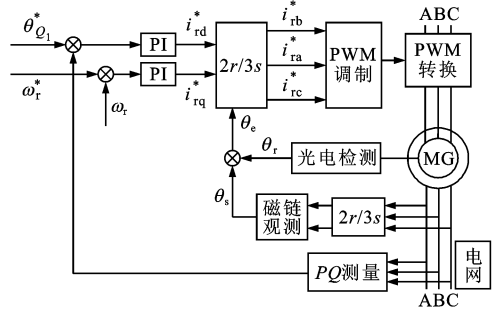


图 1 电流滞环矢量控制系统

简化控制系统,且整个控制系统中没有涉及电机参数,增强了控制策略的鲁棒性.

2 一种开环速度检测方案

双馈电机无速度传感器控制的设计可分为开环速度观测和闭环速度观测技术.开环速度观测主要是依据电机的数学模型,通过所测量的定子电气量直接计算出转子位置角或者转速.与闭环速度观测相比,其思路直观,设计简洁,但由于缺乏自校正能力,开环速度观测结果受电机参数和所测量的电压电流量谐波的影响较大.针对电流滞环矢量控制的特点,本文设计出一种简洁的开环速度观测方案,其基本原理如图 2 所示.

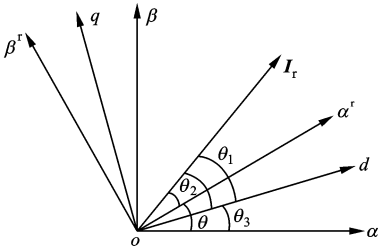


图 2 开环速度观测原理

如图 2 所示, I_r 为转子电流矢量, $\alpha\beta$ 为定子静止两相坐标系, $\alpha^r\beta^r$ 为转子两相坐标系, dq 为同步旋转坐标系. θ_1 为转子电流矢量与 dq 坐标系 d 轴的夹角, θ_2 为转子电流矢量与转子 $\alpha^r\beta^r$ 坐标系 α^r 轴的夹角, θ_3 为 d 轴与 $\alpha\beta$ 坐标系 α 轴的夹角,在定子磁链定向的情况下,该角即为所测量的定子磁链位置角.对双馈电机转速的观测实质上等同于对转子位置角的观测,即待求量为图中的 θ_r 角.

由图 2 中的各矢量位置关系可知,若测得转子电流矢量 I_r 与 d 轴和 α^r 轴的夹角 θ_1 、 θ_2 ,便可计算待求转子位置角

$$\theta_r = \theta_1 + \theta_3 - \theta_2 \tag{7}$$

至此,问题归结于 θ_1 、 θ_2 的测量.对于角度 θ_2 的测量,只需直接测量转子三相电流 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} ,通过 $3s/2s$ 变换便可计算出转子电流矢量在 $\alpha^r\beta^r$ 坐标系中的两个分量 i_{ra}^r 、 i_{rb}^r ,进而计算得

$$\theta_2 = \arctan(i_{rb}^r/i_{ra}^r) \tag{8}$$

对于角度 θ_1 的观测,可以认为,由于控制系统采用电流滞环跟踪 PWM 技术,实际电流可以很好地跟踪电流参考值,从而实际电流在 dq 坐标系中的两个分量也和参考电流的两个分量逼近,故可以无需通过测量换算,而是直接利用矢量控制中的 dq

坐标系中的两个参考电流分量 i_{rd}^* 、 i_{rq}^* 得到

$$\theta_1 = \arctan(i_{rq}^*/i_{rd}^*) \tag{9}$$

将式(8)、式(9)代入式(7),便可得到所求的转子位置角. 根据上述原理设计的开环速度观测器的PSCAD仿真模型如图3所示.

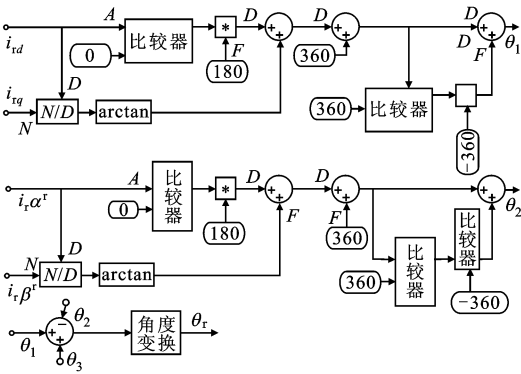


图 3 开环速度观测器的 PSCAD 仿真模型

这种处理方式直接利用矢量控制中的电流参考分量代替对实际电流分量的观测和换算,可以使观测器的设计得到简化,而且减小了测量实际电气量带来的谐波影响. 在观测器的设计中,由于没有涉及电气量的计算,从而无需依赖任何电机参数,避免了电机参数变化的不利影响. 综上所述,所设计的速度观测器在一定程度上能够克服传统开环速度观测的不利因素.

3 仿真实验与分析

为验证控制系统和速度观测器的有效性,利用PSCAD/EMTDC搭建了并网双馈风机仿真平台,并网风电系统模型如图4所示.

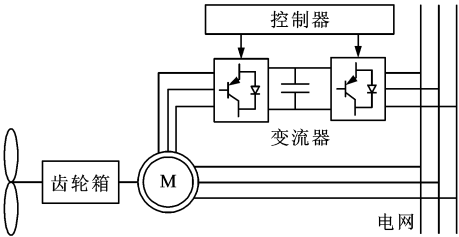


图 4 双馈风电机组模型

采用的双馈电机参数如下:额定容量 $S_N=0.4$ MV·A,定子额定电压为 0.69 kV,定子电阻标么值为0.005 4,转子电阻标么值为0.006 07,定转子互感标么值为 4.362,定子漏感标么值为 0.102,转子漏感标么值为 0.11.

仿真过程中,当时间小于 0.3 s 时,要对励磁及调速进行初始化,发电机采取转速控制,0.3 s 起发

电机进入转矩控制阶段. 若基本风速为 8 m/s,当 $1\text{ s}\leq t\leq 7\text{ s}$ 时有 5 m/s 的阵风,即最大风速为 13 m/s. 转速参考值可根据最佳转速理论和当前的风速简单计算得到. 总仿真时间为 10 s,仿真过程中定子无功功率参考值 Q^* 设置为 0.3 MV·A,仿真结果如图5所示.

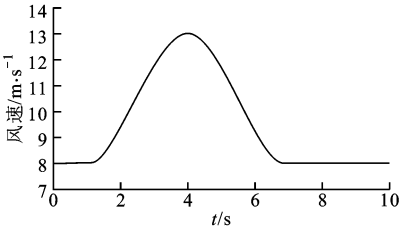


图 5 风速仿真结果

由图6可见,为保持风能跟踪所需的最佳叶尖速比,转速参考值与风速始终成正比关系,0.3 s 后电机进入转矩控制状态,约 1.5 s 后实际转速可以较好地跟踪转速参考值,而采用 SPWM 技术大约需要 2.2 s. 由图7可见,定子无功功率自 0 s 起从 0 MV·A 上升,约 0.8 s 时达到参考值 0.3 MV·A 后基本保持稳定,采用传统 SPWM 技术大约需要 1.5 s. 由图6、图7综合可见,在转速的变化过程中,定子无功对给定参考值的跟踪不受显著影响,实现了对无功功率和转速的独立调节.

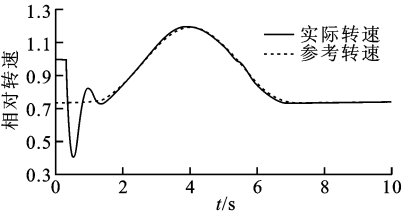


图 6 实际转速与转速参考值的比较

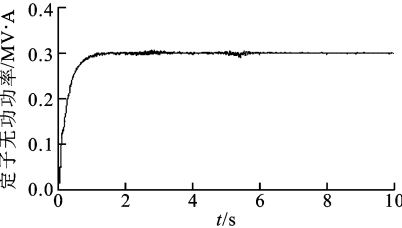
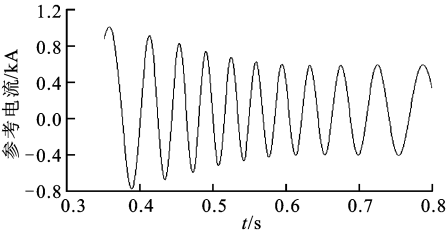


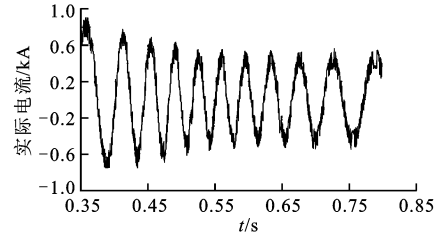
图 7 定子无功功率与时间关系

对比图8a、图8b可见,应用电流滞环跟踪技术可以实现实际电流对指令电流的有效跟踪,误差被控制在一个给定的滞环带内,滞环带设定的宽度受开关频率的限制.

转子位置角观测的仿真结果如图9所示. 对比



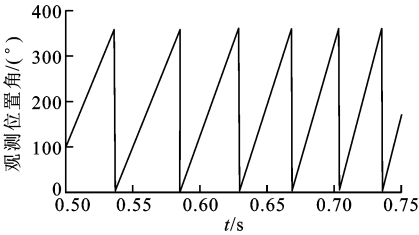
(a)转子相电流参考值



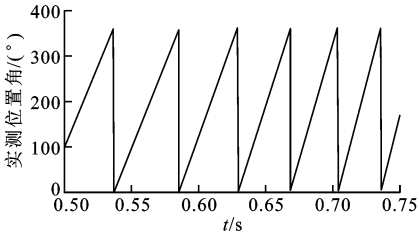
(b)转子相电流实测值

图 8 转子相电流参考值和实测值

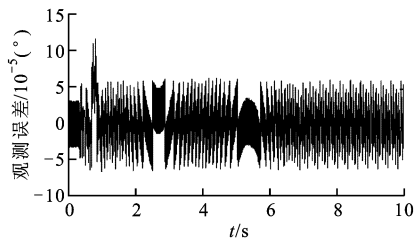
图 9a、图 9b 可见,转子位置观测值效果良好.从图 9c 的误差曲线来看,观测误差微小,达到了 $0.000\ 01^\circ$ 的



(a)转子位置角实际值



(b)转子位置角观测值



(c)转子位置角观测误差曲线

图 9 转子位置观测仿真结果

数量级,而传统的开环转子位置观测误差约为 0.1° 的数量级.观测器输出的波形平稳,受谐波影响很小,所设计的速度观测器能够取代光电编码器实现无速度传感器控制.

由以上建模及仿真结果可见:滞环矢量控制系统和开环速度观测器设计简单,且不依赖于电机参数;矢量控制响应效果良好,转子位置观测准确,可以达到无速度传感器的解耦控制要求.

4 结 论

本文应用电流滞环跟踪 PWM 技术简化了传统的定子磁链定向双馈电机矢量控制系统,由仿真实验可见,风机转速和定子无功功率跟踪参考值的速度较传统的基于 SPWM 技术的控制方法均有所提高,且控制系统不再依赖电机参数,增强了控制系统对电机参数的鲁棒性.针对所设计的滞环矢量控制系统设计了一种简洁有效的转子位置观测器.该观测器是开环速度观测器,避免了电机参数和电气量谐波的影响,在一定程度上克服了传统开环观测的缺陷.仿真结果表明:控制系统能够实现双馈风机解耦控制,转子位置观测的效果良好,从而实现了双馈风力发电机无速度传感器控制.

参考文献:

[1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社,2003.

[2] 尹明,李庚银,周明,等. 双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较[J]. 电力系统自动化,2006,30(13): 22-27.

YI Ming, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Analysis and comparison of dynamic models for the doubly fed induction generator wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13):22-27.

[3] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[4] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学电气与自动化学院,2008.

[5] YAMAMOTO M, MOTOYOSHI O. Active and reactive power control for doubly fed wound rotor induction generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(4):624-629.

[6] 童建东,张新宇,白宪庆,等. 双馈风力发电机组网侧变换器电压空间矢量电流滞环控制[J]. 中国电力,2007, 40(7):87-91.

TONG Jiandong, ZHANG Xinyu, BAI Xianqing, et al. Hysteretic current control for the grid-side convert-

- er of a double fed wind generator with voltage space vector[J]. *Electric Power*, 2007, 40(7):87-91.
- [7] 秦涛,吕跃刚,肖运启,等. 基于模型参考自适应的无速度传感器双馈风力发电机组控制技术研究[J]. *现代电力*, 2008, 25(4):64-70.
- QIN Tao, LÜ Yuegang, XIAO Yunqi, et al. Speed-senseless control strategy of induction motor for doubly-fed wind power generation system based on MRAS observer[J]. *Modern Electric Power*, 2008, 25(4):64-70.
- [8] CARDENAS R, PENA R, PROBOSTE J, et al. MRAS observer for sensor-less control of standalone doubly fed induction generators[J]. *IEEE Trans Energy Conversion*, 2005, 20(12): 710-718.
- [9] MOHAMMED O A, LIU Z, LIU S. A novel sensor-less control strategy of doubly fed induction motor and its examination with the physical modeling of machines [J]. *IEEE Trans Magnetics*, 2005, 41(5):1852-1855.
- [10] 杨旭,王兆安. 一种新的准固定频率滞环 PWM 电流控制方法[J]. *电工技术学报*, 2003, 18(3):24-28.
- YANG Xu, WANG Zhao'an. A novel quasi-constant hysteretic PWM current mode control approach[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2003, 18(3): 24-28.
- [11] 洪峰,单任仲,王慧贞,等. 一种变环宽准恒频电流滞环控制方法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(1):116-119.
- HONG Feng, SHAN Renzhong, WANG Huizhen, et al. A varied hysteresis-band current controller with fixed switching frequency[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(1): 116-119.
- [12] 何莉萍,王广柱. 基于 ICAP/4 的恒频滞环电流跟踪控制研究[J]. *电测与仪表*, 2009, 46(7):57-59.
- HE Liping, WANG Guangzhu. Study on hysteretic current control method with constant frequency using ICAP/4[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2009, 46(7): 57-59.

(编辑 杜秀杰)