

光伏并网发电系统数字锁相技术 仿真与实验研究*

阮 星

(福建省产品质量检验研究院, 福建 福州 350002)

摘要:针对传统模拟锁相环在光伏并网发电系统应用上的不足,分析了数字锁相环在光伏并网发电系统中的应用,详细说明了数字锁相环路的工作原理及控制策略,给出了环路相关参数的设计过程,并基于 Matlab 进行软件仿真,针对实际电网电压有可能出现的畸变、电压突增、突减等情况,进行了相应的抗干扰测试,并在一台 6 kVA 的工程样机上进行了实验,仿真结果和实验波形充分验证了方案的正确性。研究结果表明,数字锁相采用数字控制技术取代传统的模拟控制,在降低光伏并网逆变器成本的同时又可保证良好的输出性能,使得并网逆变器能高功率因数地向电网发电以及可靠地进行反孤岛保护,也降低了实际系统调试过程中参数修改的复杂性。

关键词:光伏系统;数字锁相;高功率因数;数字信号处理器

中图分类号:TM914;TN9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)11-1400-04

Research of DPLL for photovoltaic grid-connected power generation system

RUAN Xing

(Fujian Inspection and Research Institute for Product Quality, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Aiming at the shortages of the use of conventional analog phase-locked loop in photovoltaic grid-connected power generation system, the use of digital phase-locked loop in photovoltaic grid-connected power generation system was analyzed, the working principle and control strategy were described in detail, the design process of the relevant circuit parameter was presented, and software simulation was carried out based on Matlab. For the distortion, sudden increase, sudden reduction in voltage in actual power grid, corresponding anti-jamming test was carried out in simulation. And ultimately, the control strategy on a 6 kVA experimental prototype was experimentized. Experimental results and waveforms show the validity of the scheme. Digital PLL uses digital control technology instead of conventional analog control technology, besides reducing the cost of photovoltaic grid-connected inverter, high output performance is insured. It can make the grid-connected inverter generate power to the grid with high power factor and anti-islanding protect reliably, it also can reduce the complexity in the debugging of actual system.

Key words: photovoltaic system; digital phase-locked loop(PLL); high power factor; digital signal processor(DSP)

0 引言

光伏并网发电系统是将太阳能电池的直流电能转化为正弦交流电能的有源逆变系统^[1]。由于光伏并网发电系统无需储能并且能源利用率高,已逐渐成为

当今世界新能源应用的主流方向之一。但是在光伏并网发电系统中,需要实时检测电网电压的相位和频率以控制并网逆变器,使其输出的并网电流与电网电压相位及频率保持同步,即同步锁相。同步锁相是光伏并网系统的一项关键技术,也是应用开发上的一个主

要难点,其控制精确度直接影响到系统的并网运行性能。倘若锁相环电路不可靠,在逆变器与电网并网工作切换中会产生逆变器与电网之间的环流,对设备造成冲击,缩短设备使用寿命,严重时还将损坏设备。因此,在光伏并网发电系统中必须加入锁相环(PLL, Phase-Locked Loop)技术,使其能够自动追踪输入信号频率与相位^[2-3]。另外,光伏发电系统除了和其他的电源系统一样要具有常规的保护功能,如过压、过流、过温、过频、欠频等功能外,还必须具有孤岛保护的功能,而孤岛保护方法里的主动频率扰动法效果的好坏很大一部分取决于锁相环的质量^[4]。

锁相环是一种反馈控制电路,应用广泛。近几年,由于数字锁相与传统模拟锁相相比,能够减少对硬件电路参数的依赖,易于实现,而且控制方便,逐渐成为研究的热点^[5]。对此本研究提出一种基于数字锁相环的高功率因数新型并网电流幅值和相位跟踪控制方法,建立仿真模型,给出仿真控制效果。最后,结合 TI 公司的 TMS320F2808 芯片给出光伏发电系统数字锁相环的设计过程,并最终在实验样机上实验以验证方案的有效性和实用性。

1 数字锁相环的控制方案

1.1 锁相原理

电网的电压是按正弦规律变化的,同样光伏并网发电系统输出的并网电流也是按正弦规律变化的,设电网的频率为 f_g , 并网电流的频率为 f_i , 则电网电压和并网电流的瞬时值可分别表示为:

$$u_g = U_m \sin(2\pi f_g t) \quad (1)$$

$$i_g = I_m \sin(2\pi f_i t + \theta) \quad (2)$$

为了实现同步,使得系统输出功率因数为 1,关键要满足如下关系:

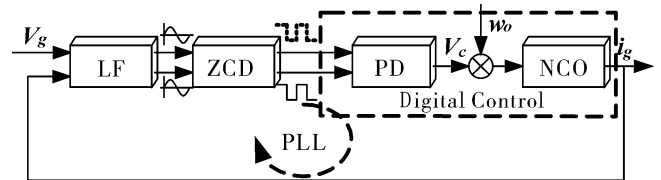
$$2\pi f_g = 2\pi f_i + \theta \quad (3)$$

并网电流的频率必须与电网电压相等,否则就谈不上同相了,式(3)中 θ 与 f_g 都是不可变的,因此只能通过调节 f_i 来实现同步锁相,当并网电流超前电网电压时,则要求减小并网电流频率 f_i , 而当并网电流滞后电网电压时则要增大 f_i , 如此往复,经过几个周期调整后便可实现并网电流和电网电压同步锁相。

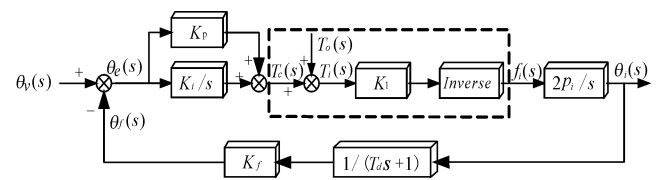
锁相是一个闭环控制过程,主要包含鉴相器(PD, Phase Detector)、环路滤波器(LF, Loop Filter)以及压控振荡器(VCO, Voltage Controlled Oscillator)这 3 个基本部件,鉴相器主要将输入的信号与反馈的信号作比较获取相位差信息,环路滤波器 LF 主要用来滤除 PD 输

出中的高频成分以及调整环路参数,它对整个 PLL 环路的性能起着至关重要的作用,LF 的输出信号用于控制 VCO 的输出频率与相位,VCO 根据反馈回来的相位差信息调节输出信号的频率或相位,逐步实现同频同相,这就是基本锁相环的工作原理^[6]。

随着数字芯片的大量应用,传统的模拟锁相环渐渐被数字锁相环所取代,数字锁相环以其参数调节方便、成本低廉等众多优势受到越来越多的关注,数字锁相环的原理类似于传统的模拟锁相环,只不过环内相应的模块全部由数字运算实现,其基本原理框图如图 1(a)所示,信号调理电路先对输入的电网电压信号和并网电流信号进行低通滤波,之后再经过过零检测模块(ZCD, Zero Cross Detector)获得方波信号送入数字芯片,数字芯片对送进来的方波信号进行处理,获取频率与相位信息后再根据相应的信息对输出进行控制^[7-8],图中,NCO(Numerically Controlled Oscillator)表示数控振荡器。



(a) 基本框图



(b) 细化框图

图 1 数字锁相框图

1.2 数字锁相控制方法及环路分析

对于纯数字控制的光伏并网逆变器,可通过固定系统产生的 SPWM 波的载波比,并通过调整载波频率来进行输出频率的微调,从而实现频率的锁定与相位的跟踪,本研究就是用这种方法进行频率调节的^[9-10],为了便于进行闭环环路分析,图 1(a)的基本框图可以描述为如图 1(b)所示。

在图 1(b)中, $\theta_v(s)$ 、 $\theta_i(s)$ 、 $\theta_e(s)$ 分别表示电网电压相位,反馈的并网电流相位及二者的相位差,前向通道的 K_i 是频率转换系数,用来将程序里的虚拟信号频率值转换为具有实际物理意义的频率值,反馈通道里的比例系数 K_f 一方面也起转换系数作用(将实际的物理相差信息转换为虚拟的数字信号),同时也起到了调节开环增益的作用, T_d 则表示系统采样及控制延迟^[11-12],根据图 1(b)的框图可以列出如下方程:

$$\theta_e(s) = \theta_i(s) - \theta_f(s) \quad (4)$$

$$T_c(s) = (k_p + k_i/s) \cdot \theta_e(s) \quad (5)$$

$$f_i(s) = K_1 / (T_c(s) + T_0(s)) \quad (6)$$

$$\theta_i(s) = 2\pi f_i(s) / s \quad (7)$$

$$\theta_f(s) = K_f \theta_i(s) / (T_d s + 1) \quad (8)$$

由式(6)可知系统中存在非线性方程,为了方便 PID 参数设计,需对其进行线性化,对输入的电网频率 $f_v(s)$ 施加一小信号扰动,用小信号分析法进行线性化可得:

$$\overline{f_i(s)} - \overline{f_i(s)} \cdot K_1 \overline{f_v(s)} (T_c(s) - \overline{T_c(s)}) + f_i^*(s) = \overline{f_v(s)} \quad (9)$$

考虑稳态时输出的并网电流频率平均值 $\overline{f_i(s)}$ 与电网电压频率平均值 $\overline{f_v(s)}$ 相等,式(9)可化为:

$$f_i^*(s) = K_1 (\overline{f_v(s)})^2 (T_c(s) - \overline{T_c(s)}) \quad (10)$$

因此,并网电流频率可表示为:

$$f_i(s) = \overline{f_i(s)} - K_1 (\overline{f_v(s)})^2 \overline{T_c(s)} + K_1 (\overline{f_v(s)})^2 T_c(s) = w_o + K_1 (\overline{f_v(s)})^2 T_c(s) \quad (11)$$

式中: w_o —数控振荡器的固有振荡角频率。

本研究采用的数字控制芯片是德州仪器(TI)公司的 TMS320F2808 型号的 32 位 DSP, 假设稳态时电网的频率平均值 $\overline{f_v(s)}$ 为 50 Hz, 则 DSP 内部捕获模块计数值从 0 计数到 2 000 000 对应一个工频周期(20 ms), 则可求得 $K_1 = 1 \text{ e}^{-8}$, $K_f = 2\,000\,000 / 2\pi$, 另有稳态时 $\overline{T_c(s)} = 0$, 则 $w_o = 50$, 可求得:

$$f_v(s) = 50 + \frac{1}{4\,000} u_c(s) \quad (12)$$

取延迟时间 $T_d = 0.001 \text{ s}$, 可求得系统的开闭环传递函数分别为:

$$G_0 = \frac{50(K_p s + K_i)}{s^2(1 + 0.001s)} \quad (13)$$

$$G_c = \frac{\theta_v(s)}{\theta_i(s)} = \frac{(1 + 0.001s)(K_p s + K_i)\pi}{20s^3 + 2e^3 \cdot s^2 + 1e^6 \cdot K_p s + 1e^6 \cdot K_i} \quad (14)$$

运用劳斯判据,可求得上述系统的稳定的充要条件为:

$$\begin{cases} K_p > 0.01K_i \\ K_i > 0 \end{cases} \quad (15)$$

参考式(15),借助 Matlab 工具调节相应的 PI 参数^[13],系统的开环伯德图如图 2 所示,由图可知,全部相频特性在 -180° 之上,相频特性满足要求,当 $K_p = 8.5$, $K_i = 0.4$ 时, $\gamma = 68.4^\circ$, 当保持 K_p 不变,增大 K_i ,从图

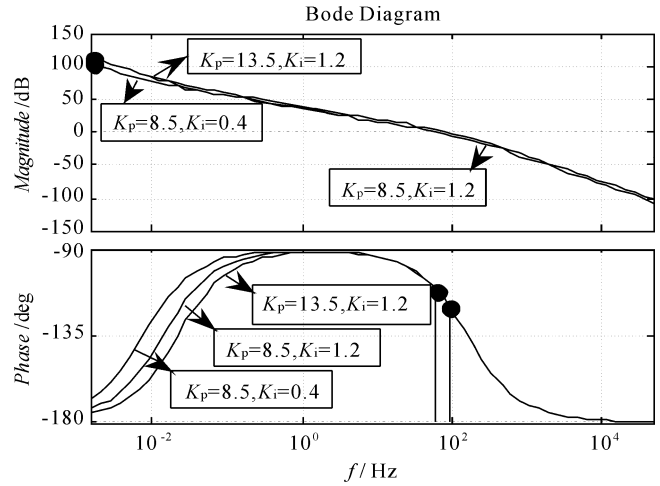


图 2 系统开环传递函数伯德图

中可知低频段增益加大,稳态误差减小,但系统的稳定裕度却减小;当保持 K_i 不变,增大 K_p ,从图中可以看出,系统的带宽变宽,而动态响应加快,但稳定性却变差,综合考虑,最后选定 PI 参数为: $K_p = 8.5$, $K_i = 1.0$ 。

2 数字锁相控制的仿真分析

本研究采用仿真软件 Matlab/Simulink 对一全桥逆变系统进行锁相仿真实验,为了使仿真更接近实际的数字控制,用数控振荡器(NCO)代替传统的压控振荡器(VCO),仿真图如图 3 所示,系统参数如下:直流母线电压 400 V,开关频率 16 kHz,滤波电感 3.2 mH,滤波电容 2.2 μF ,设计的数控振荡器 NCO 中心频率 (45 Hz/50 Hz/55 Hz), 频率精度为 0.01 Hz, 采样时间 $T_s = 1/16\,000 \text{ s}$, 要求相位差为 0, 仿真采用变步长的 ODE45 算法,相对公差为 1 e^{-8} , 仿真时间 1 s。

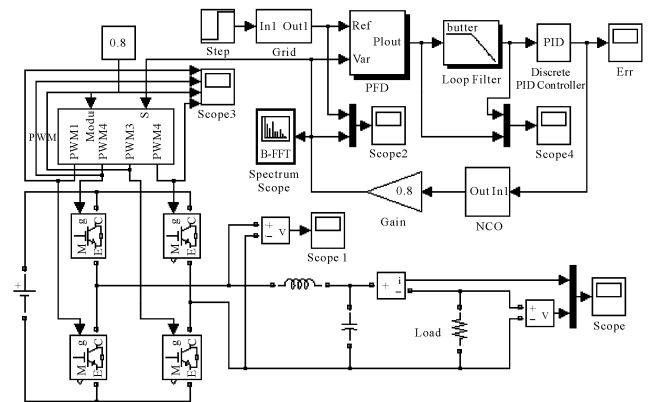
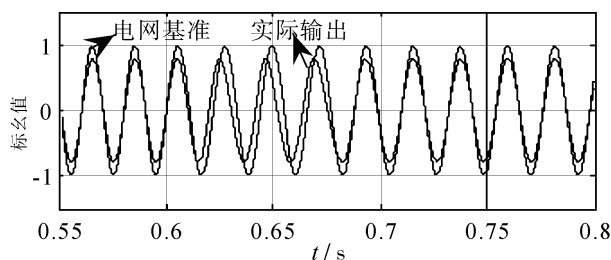
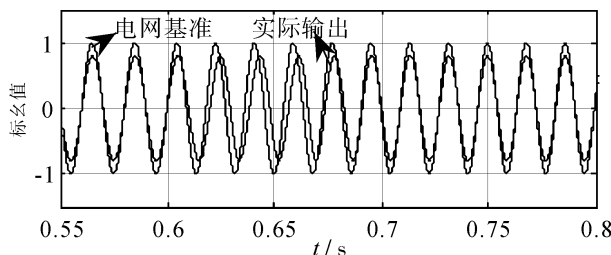


图 3 逆变系统锁相仿真电路图

仿真结果如图 4 所示,考虑实际电网的波动性,对系统在 0.6 s 处施加频率扰动,从 50 Hz $\rightarrow$ 45 Hz 的扰动控制效果如图 4(a)所示,而从 50 Hz $\rightarrow$ 55 Hz 的扰动控制效果如图 4(b)所示,由图可知,锁相环能有效地锁定电网频率和相位。

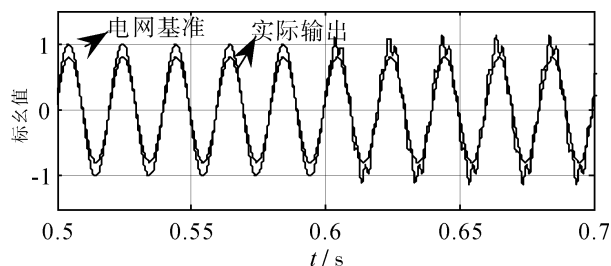


(a) 电网频率突减扰动(50 Hz→45 Hz)

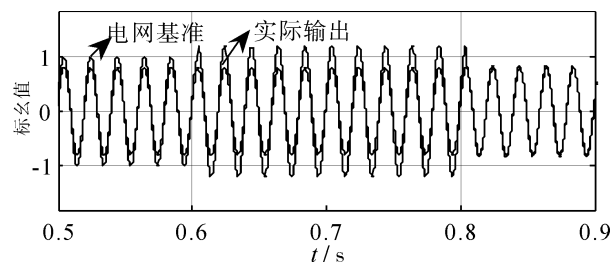


(b) 电网频率突加扰动(50 Hz→55 Hz)

图 4 电网频率扰动仿真波形



(a) 电网电压畸变扰动测试



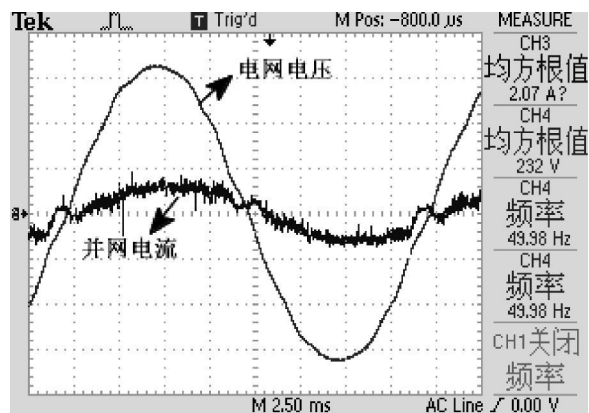
(b) 电网电压幅值扰动变化测试

图 5 电网电压畸变及幅值变化扰动仿真波形

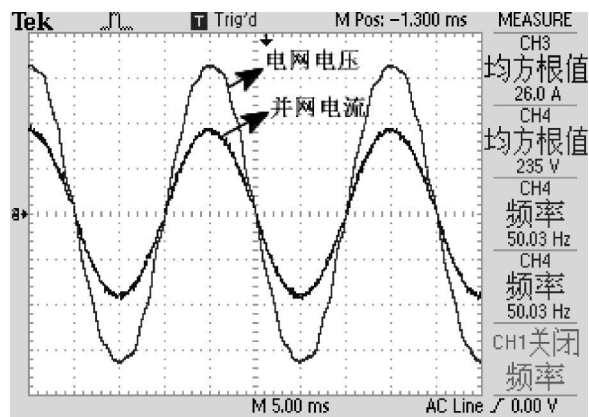
同样,考虑实际电网电压可能出现的畸变以及幅值的波动等情况,本研究也对电网的畸变扰动及幅值变化扰动进行仿真,仿真结果如图 5 所示,其中,在 0.6 s 处对电网加入 7 次谐波,如图 5 (a)所示;分别在 0.605 s 处将电网电压幅值阶跃增大及 0.805 s 处将电网电压幅值阶跃减小,如图 5 (b)所示。仿真结果表明该锁相环在抗电网电压畸变及幅值变化引起的扰动方面具有较强的鲁棒性。

3 实验结果

笔者研制了一台 6 kVA 的光伏并网发电系统实验样机,采用数字信号处理器芯片 TMS320F2808 构成控制电路,2808 工作频率为 100 MHz,设定定时器的



(a) 轻载实验波形



(b) 满载实验波形

图 6 实际样机实验结果

时钟频率与系统时钟频率一样,对上述的控制方案进行验证,理论上锁相精度可以达到 0.144° 。实际样机测试波形如图 6 所示(纵坐标分别对应电压和电流幅值,横坐标为时间,单位 ms,测试环境电网电压 $THD=2.3\%$)。其中,轻载时的控制波形如图 6(a)所示,测得 PF 值为 0.984,满载时的控制波形如图 6(b)所示,测得 PF 值为 0.999。从实验结果可以看出,本研究的锁相控制方案起到了很好的效果,有效保证了光伏并网发电系统输送给电网的基本上都是有功能量。

4 结束语

光伏并网发电系统已越来越多地使用数字锁相控制技术,本研究详细分析研究了光伏并网发电系统的数字锁相控制方法以及参数设计过程,并在 Matlab 软件平台上对控制方案进行仿真,同时也针对电网电压可能出现的一些突变情况,对数字锁相控制的抗干扰性进行研究。最后,基于 TMS320F2808 的数字控制平台对提出的数字锁相控制方案在实际的工程光伏并网逆变器样机上进行测试,仿真和实验结果均证实了控制方案的有效性和实用性。

(下转第 1408 页)

4 结束语

超声液位传感器中压电陶瓷作为机电转换元件,很难从传统的解析法入手对其瞬态特性进行准确的求解分析。有限元方法为分析压电陶瓷瞬态特性分析提供了一条有效途径。环状分布的压应力可以提高超声液位传感器的灵敏度。对于处于发射状态的压电陶瓷,环状分布压应力,能够提高其声辐射强度;同样,对于处于接收状态的压电陶瓷,也可以提高接收电压脉冲强度。环状分布的压应力,可导致压电陶瓷表面出现应力集中和循环载荷。长期工作后,可能会导致压电陶瓷表面疲劳破损和退极化而失效,影响超声液位传感器的工作寿命。因此,设计超声液位传感器时,应考虑多场耦合作用下压电陶瓷场致疲劳问题,设计合理的压应力和加载形式,统筹兼顾传感器的灵敏度和可靠性,避免因压电陶瓷损坏导致传感器失效。

参考文献(References):

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [2] 李明轩. 超声检测用压电换能器瞬态特性可控可调[J]. 应用声学,2008,27(5):338-344.

- [3] HILL R, FORSYTH S A. Finite element modeling of ultrasound, with reference to transducers and AE waves[J]. **Ultrasonics**, 2004(42):253-258.
- [4] EVERSTINE G C. Finite element formulations of structural acoustics problems [J]. **Computers & Structural**, 1997, 65(3):307-321.
- [5] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [6] 莫西平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(6):1279-1290.
- [7] 冯诺. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社, 2006.
- [8] RICON Y G, FREIJO F M E. Piezoelectric modeling using a time domain finite element program [J]. **Journal of the European Ceramic Society**, 2007(27):4153-4157.
- [9] 张朝晖. ANSYS11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [10] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [11] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 2 版. 南京:南京大学出版社, 2006.

[编辑:李辉]

(上接第 1403 页)

参考文献(References):

- [1] 宋金莲, 赵慧, 林珊. 太阳能发电原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [2] 孙中记, 郭吉丰. 基于锁相环电路的超声波电机频率跟踪系统[J]. 机电工程, 2008, 25(5):57-61.
- [3] 刘文彦. 时钟恢复在电力电子系统集成中的应用[J]. 机电工程, 2006, 23(16):1-4.
- [4] CIOBOTARU M, AQELIDIS V, TEODORESCU R. Accurate and less-disturbing active anti-islanding method based on PLL for grid-connected PV inverters [C]//PESC2008. Rhodes, Greece: [s.n.], 2008:4569-4576.
- [5] 孙健, 潘俊民, 赵小. 基于数字锁相环的并网逆变器电流跟踪控制[J]. 电能质量, 2010(7):41-45.
- [6] HIEU N T, LEE T W, PARK H H. All-digital phase-locked loop for optical interconnect applications [C]// I-CACT2007. Gangwon-Do, Korea: [s.n.], 2007:1829-1832.
- [7] 张承慧, 叶颖, 陈阿莲, 等. 基于输出电流控制的光伏并

- 网逆变电源[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8):41-45.
- [8] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10):94-99.
- [9] 曹凤香, 罗昉, 康勇. 基于单片机的 UPS 数字化锁相技术[J]. 电力电子技术, 2007, 41(6):86-88.
- [10] RUBENS M, FILHO S, SEIXAS P F, et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2008, 55(8):2922-2923.
- [11] 李学初, 高清运. 锁相环仿真算法的研究[J]. 南开大学学报:自然科学版, 2008, 41(1):23-26.
- [12] IWANSKI G, KOCZARA W. PLL grid synchronization of the standalone DFIG based wind turbine or rotary UPS [C]//EUROCON2007. Warsaw, Poland, 2007:2550-2555.
- [13] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27):36-41.

[编辑:李辉]