

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.01.017

基于无差拍的光伏并网系统电流控制策略

楼海星, 姚 维

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要:针对光伏并网系统中传统双PI控制所得并网电流质量不高的缺陷,提出了电压外环采用PI调节,电流内环采用无差拍的控制策略。阐述了无差拍控制的基本原理,并提出了预测型无差拍控制的实现方法。分析了谐波产生的主要原因并采用数字滤波方式来提高精度。在MATLAB/Simulink中进行整个系统的仿真,仿真结果表明在理论上该控制策略能将电流总谐波失真控制在1%以内。在样机上的实验结果表明,该控制策略能有效改善并网电流质量,达到国家对光伏并网电流THD小于5%的要求。

关 键 词:光伏系统;无差拍控制;电流控制策略;谐波畸变率

中图分类号:TP274

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)01-0068-05

Photovoltaic Grid-Connected Current Control Strategy Based on Deadbeat Control

LOU Haixing, YAO Wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of excessive harmonic current by the traditional double PI control strategy in the photovoltaic grid-connected system, a strategy with PI control in voltage outer-loop and deadbeat control in current inner-loop was proposed. The basic principle of deadbeat control was described and a method of predictive deadbeat control was presented. The main reasons of the harmonic were analyzed and the digital filtering methods were used to improve the accuracy. The whole system was simulated by the MATLAB/Simulink. The simulation result shows that in theory the control strategy could control the total harmonic distortion (THD) within 1%. The experiment result on the prototype shows the control strategy could effectively improve the quality of the grid current to reach the national standard of which the THD is less than 5%.

Key words: PV system; deadbeat control; current control strategy; total harmonic distortion(THD)

随着能源危机日益加重,光伏产业作为可再生清洁能源越来越受到政府、高校和企业的关注。目前我国对传统化石能源依赖程度较高,对环境造成严重污染。然而我国幅员辽阔,太阳能资源十分丰富,因此大力发展光伏产业是非常紧迫的任务。

光伏产业中,太阳能发电是一个十分重要的方向。电流谐波是影响光伏发电系统正常运行的主要干扰源^[1],它会污染电网,使正弦电压发生畸变,对供电线路造成损害,增大了供电线路的损耗,造成电动机等设备不正常运行甚至损坏。因此,抑制并网电流谐波水平是十分重要的。

通过电流总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)可以衡量电流谐波水平。THD的抑制可通过添加LCL、LC滤波器等硬件措施来解决^[2]。由于光伏逆变器是谐波的主要来源^[3],因此还可通过改进逆变器控制策略来降低THD水平,提高并网电流的质量。传统的光伏发电系统一般采用双PI控制,该方案不仅PI参数不易整定,而且抗干扰能力弱,动态响应慢^[4],对于THD的要求也难以达到。本文提出了一种电压外环采用PI控制、电流内环采用预测型无差拍的控制策略。实验结果证明,它能有效抑制THD水平,大大改善并网电流质量,满足并网电流的国家标准。

收稿日期:2014-05-12;修回日期:2014-07-10

作者简介:楼海星(1989),男,浙江临安人,硕士研究生,主要研究方向为光伏并网技术。E-mail:louhaixing89@163.com

1 光伏并网逆变系统简介

光伏并网逆变器是将光伏阵列产生的直流电逆变成交流电,并将其接入电网的关键设备。若逆变器输出电流质量不高,可能会影响电网电流质量,造成用户负载无法正常运行。不但会造成巨大的能源浪费,而且还会损害用户的设备。因此,需要对并网电流的质量水平如频率、THD 等严格把关。

本文研究的逆变器采用两级式结构,前级采用 Boost 电路将光伏面板输入的直流电压升高,后级采用经典的 H 桥逆变电路实现电流的逆变过程。前、后级相互解耦,方便控制。本文针对后级的控制策略进行了研究。

图 1 是系统的电路图,其中: T_1 - T_4 、 D_1 - D_4 是由 4 个 IGBT 管和 4 个二极管组成的全桥逆变电路; u_{inv} 为逆变器输出电压; u_{grid} 为电网电压。图 2 是理想工况下,逆变电路工作波形,其中 U_{T1} - U_{T4} 是开关管驱动电压波形。 T_1 、 T_3 2 个开关管受频率为 50 Hz 的互补方波控制, T_2 、 T_4 2 个开关管受频率为 16 kHz 的 SPWM 信号控制。本文采用单极性调制的方式。电路中 T_1 、 T_4 和 T_2 、 T_3 2 组开关管以 50 Hz 的频率交替导通,从而完成直流到交流的逆变过程。在 2 组开关管互相切换时,为了防止上下桥臂直通造成短路,留有一定的死区时间。 u_{inv} 中的虚线是与 PWM 方波等效的正弦波。由于输出端存在电感, i 略滞后于 u_{inv} Δt 的时间,由于 Δt 的时间极短,工程实际中,可以忽略。 i 与电网电压同频同相,经滤波后并入电网。

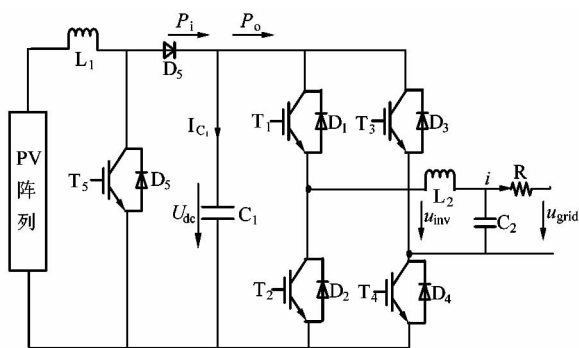


图 1 系统电路图

Figure 1 System circuit diagram

2 控制策略

2.1 外环 PI 控制

电压环的目的是保持直流母线电压稳定,进而维持前后级功率平衡。

设 P_o 为输出功率, I_{gm} 为并网电流 i 的幅值, U_{gm} 为电网电压幅值。 P_i 为由光伏电池输入的功率, I_{C1} 为母

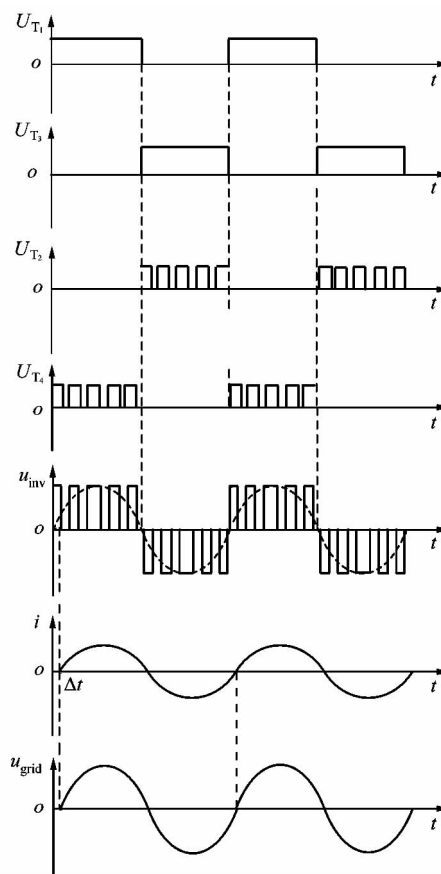


图 2 逆变电路工作波形

Figure 2 Working waveform of the inverter
线电容电流, U_{ref} 为给定电压, U_{dc} 为直流母线电压。

为简化分析,在分析电压环时,忽略输出等效电阻 R 的影响,同时不计功率损耗。则

$$P_o = \frac{U_{gm}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{gm}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{gm} \times I_{gm}}{2} \quad (1)$$

由功率平衡可知

$$I_{C1} = \frac{P_i - P_o}{U_{ref}} \quad (2)$$

根据拉氏变换得

$$U_{dc} = \frac{I_{C1}}{sC_1} \quad (3)$$

根据上述关系可得图 3 所示的电压环控制框图。

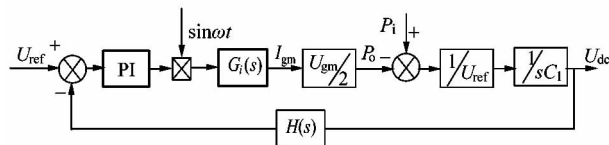


图 3 电压外环控制框图

Figure 3 Block diagram of voltage outer-loop control
其中 PI 为电压外环调节器; $G_i(s)$ 为电流内环调

节器; $\sin \omega t$ 是与电网电压同步的正弦表; $H(s)$ 为半周期均值滑动滤波器, 下文会提到。

对直流母线电压 U_{dc} 进行采样, 经 $H(s)$ 滤波后, 与给定的参考电压 U_{ref} (通常取值为 360 ~ 400 V) 比较, 将所得误差经 PI 调节器获得电流内环的电流幅值。将所得电流幅值与通过电网电压锁相得到的正弦表相乘, 进而得到内环电流的参考值 i_{ref} 。将 i_{ref} 与实际并网电流采样值 i 比较后经内环调节器调节, 输出驱动信号, 以驱动开关管 T_2 、 T_4 。

2.2 内环预测型无差拍控制

图 4 是内环电流的控制框图。 $G_2(s)$ 是电流调节器, 文中采用的是预测型的无差拍控制方式。 K_{pwm} 是逆变器等效模型, $G_3(s) = \frac{1}{sL_2 + R}$ 是滤波电感和等效电阻的传递函数。

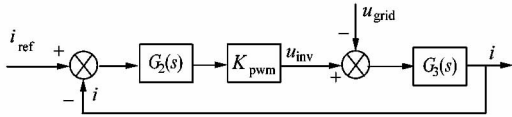


图 4 电流内环控制框图

Figure 4 Block diagram of current inner-loop control

无差拍控制是一种对电路精确模型的控制方式^[5], 它具有跟踪精度高、动态响应快的优点, 而且控制方式简单, 易于实现^[6-8]。其基本思想是: 在每个开关周期时, 通过采样获得当前周期的电流值, 并与下一周期电流目标值作比较, 进而计算出下个周期逆变桥开关管的占空比, 使在 $(k+1)$ 时刻实际电流值能够跟踪上目标电流值^[9-12]。

逆变侧电容 C_2 主要作用是与 L_2 共同确定系统谐振频率, 滤除高频成分。理想情况下, C_2 两端电压近似等于电网电压, 流经 C_2 上的电流可忽略不计。为方便分析, 在此近似认为流经 C_2 的电流为零。

以 T_1 、 T_4 导通的情况为例。对于图 1 所示电路, 可得基尔霍夫电压方程为

$$U_{inv} = L_2 \frac{di}{dt} + Ri + u_{grid} \quad (4)$$

如图 1 所示, U_{inv} 是逆变端电压。将公式 (4) 离散化, 得

$$U_{inv}(k+1) = \frac{L_2}{T_s}(i(k+1) - i(k)) + Ri(k) + u_{grid}(k) \quad (5)$$

其中: T_s 为采样周期, $u_{inv}(k+1)$ 是离散化的逆变端电压。由于 $u_{inv}(k+1)$ 的调节目标是下一拍的值,

故用 $(k+1)$ 来表示。

$$u_{inv}(k+1) = D(k+1)U_{dc} \quad (6)$$

其中: $D(k+1)$ 为开关管 T_4 的下一拍的占空比。 U_{dc} 为直流母线电压采样值。

将 (6) 式代入 (5) 式后, 可得

$$D(k+1) = (L_2/T_s)(i(k+1) - i(k)) + Ri(k) + u_{grid}(k)/U_{dc} \quad (7)$$

在 (7) 式中, $i(k+1)$ 为下一拍的目标值, 该值由经外环 PI 调节输出的 i_{ref} 值离散化而得。 $i(k)$ 为当前周期的采样值, $u_{grid}(k)$ 为交流电网电压值, U_{dc} 为直流母线电压采样值, T_s 是采样周期, L_2 为输出电流滤波电感值。

根据上式, 对各个数据进行采样, 就能获得每个周期的占空比 $D(k+1)$, 进而输出 SPWM 波来调整电流, 实现并网电流的常规无差拍控制。

在工程应用中, 由于 DSP 滞后一拍控制、采样时延、PWM 值匹配滞后等原因, 会造成内环控制精度的降低。为此, 本文提出了一种改进的无差拍控制技术, 用预测的交流电流、交流电压值来代替采样值。

将 (7) 式改写为

$$D(k+1) = (L_2/T_s)(i'(k+1) - i'(k)) + Ri'(k+1) + u'_{grid}(k+1)/U_{dc} \quad (8)$$

其中, $i'(k+1)$, $u'_{grid}(k+1)$ 分别是 $(k+1)$ 周期的电网电流和电网电压的预估值。由于 DSP 中开关频率较高, 在采样周期内基本可认为采样值是线性变化, 故可用线性插值法通过周期 k 和周期 $(k-1)$ 的采样值预估, 估算公式如下

$$i'(k+1) = 2i(k) - i(k-1) \quad (9)$$

在工程运用中, 为了避免采样精度带来的误差, 采用平均值来代替瞬时值。本文采用预估值和采样值的平均来作为该周期的平均值

$$\overline{i'(k)} = (i'(k+1) + i(k))/2 \quad (10)$$

$$\overline{i'(k)} = 1.5i(k) - 0.5i(k-1) \quad (11)$$

使用线性差值后, 可得

$$\overline{i'(k+1)} = \overline{i'(k)} + i(k) - i(k-1) \quad (12)$$

$$\overline{i'(k+1)} = 2.5i(k) - 1.5i(k-1) \quad (13)$$

同理

$$\overline{u'_{grid}(k+1)} = 2.5u_{grid}(k) - 1.5u_{grid}(k-1) \quad (14)$$

用 (13) 式中的 $\overline{i'(k+1)}$, (14) 式中的 $\overline{u'_{grid}(k+1)}$ 分别代入 (8) 式中的 $i'(k+1)$ 和 $u'_{grid}(k+1)$ 即得到了预测型的无差拍控制计算公式。

文中内环调节器采用预测型无差拍控制方式。

2.3 谐波分析及抑制

由于前级的直流母线电压中含有 2 倍频的交流脉动,即可将图 1 中的直流电压 U_{dc} 分解成直流分量和 2 倍频交流分量的叠加^[13]。该交流分量经过后级逆变控制,会在逆变输出电流中叠加 3 倍频的分量,造成 3 次谐波过高。为了抑制该交流分量,对 U_{dc} 进半周期的均值滑动滤波,通过图 3 中的 $H(s)$ 实现。滤除交流分量的干扰,获得直流母线电压值。

全桥控制中的死区时间会使输出电流失真,造成正弦电流变形、电流质量下降,THD 增加。光伏发电系统采用的是数字控制方式,存在采样延时、PWM 匹配控制延时等固有的误差。此外,传感器造成的采样精度也会影响控制效果。以上因素的影响可以通过数

字控制中进行多次采用取平均值的数字滤波方式,补偿修正等措施加以抑制。

3 仿真及结果

根据上述原理,在 MATLAB/Simulink 中通过搭建整个系统的模型来进行仿真研究。在仿真实验中, U_{ref} 取 380 V、输入功率为 3 kW、电压外环中的 P 选取 0.5、 I 选取 0.2、电流内环滤波电感 L_2 取 3.2 mH、等效电阻 R 为 0.3 Ω 、开关频率为 16 kHz。

图 5 是系统仿真图。前级完成光伏输入以及母线升压过程。后级的电流控制采用双环结构:电压外环采用 PI 控制;电流内环采用预测型的无差拍控制方式,以上控制过程均用 S-Function 函数实现。

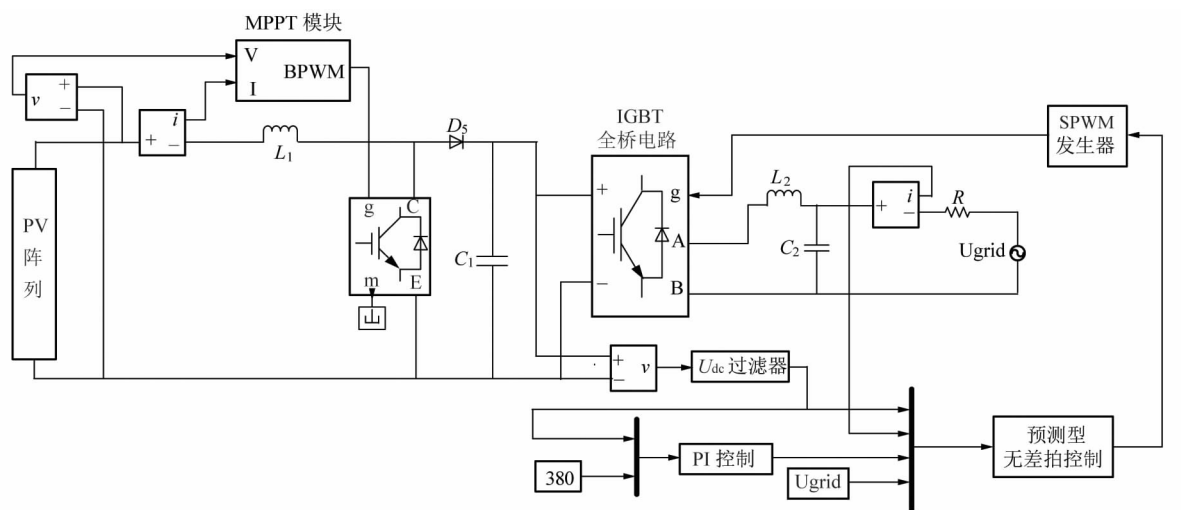


图 5 系统仿真图

Figure 5 System simulation diagram

图 6 是系统在 MATLAB/Simulink 中仿真后的电网电压波形和并网电流波形。图 7 是仿真电流谐波分量图。由图 7 仿真结果可知,并网电流 THD 低于 1%,奇次谐波中最大的为 3 次谐波,在 0.5% 左右,偶次谐波最大的不超过 0.1%。根据 NB/T 32004—2013 中规定谐波要求,奇次谐波含有率不超过 4%、偶次谐波不超过 1%、谐波畸变率限值为 5%,仿真结果远远优于标准的规定要求。

4 实验及结果

为了检验仿真结果在实际系统中的应用效果,本文根据仿真中的参数搭建了额定功率为 3 kW 的光伏并网样机。为了避免传感器在采样时带来的误差,本文对采样值进行了均值滤波。采样周期 T_s 取 62.5 μs ,开关频率为 16 kHz, L_1 取 1.6 mH, C_1 取 2 820 μF , L_2 取 3.2 mH, C_2 取 1 μF ,等效电阻 R 0.3 Ω 。文中开

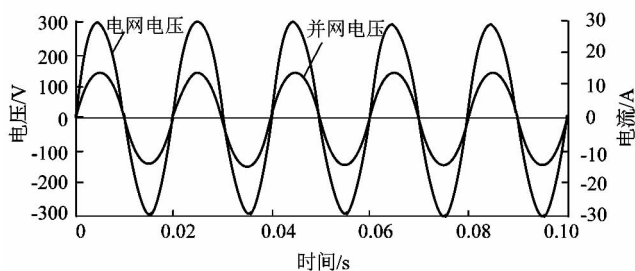


图 6 仿真波形

Figure 6 Simulation waveform

关管选用的是英飞凌的 IKW50N60T,二极管选用的是 IXYS 的 DSEP60-06A。

样机系统的主控芯片选用的是 TI 的 TMS320F2808 型 DSP,并用 Chroma 的可编程直流电源模拟光伏电源,采用 Fulke 的三相功率分析仪来测量谐波。

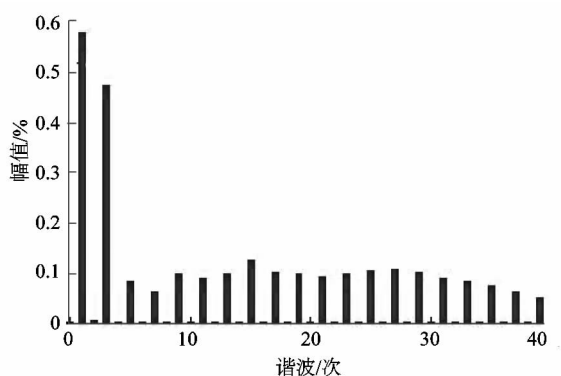


图7 仿真电流谐波分量图

Figure 7 Simulation diagram of current harmonic component

当输出功率为 3 kW 时,电网电压波形和并网电流波形如图 8 所示。如图 9 所示,其电流 THD 为 1.05% 左右。各次谐波分量如图 10 所示。

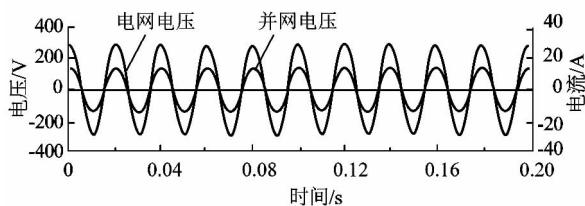


图8 逆变波形

Figure 8 Inverter waveform

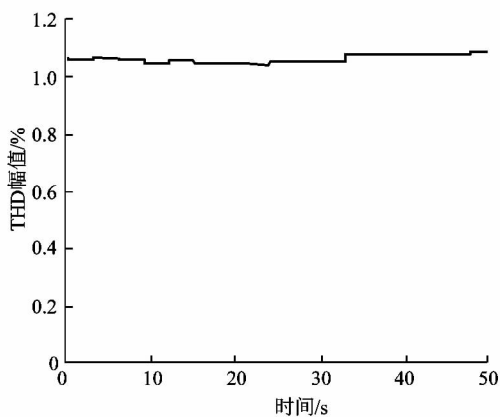


图9 并网电流 THD 曲线

Figure 9 THD curve of grid-connected current

实验结果验证了本文采用的控制策略能够有效抑制光伏并网电流的谐波分量,谐波总畸变率控制在 1% 左右,各次谐波指标都远远优于国家规定的并网要求。

5 结语

为了改善光伏并网系统输出电流质量,本文在分析谐波产生原因的基础上,结合数字控制特点,提出了

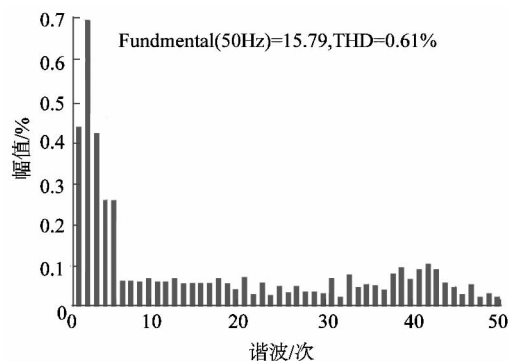


图10 电流谐波分量图

Figure 10 Harmonic component diagram of grid-connected current

一种基于无差拍的控制策略。通过 MATLAB/Simulink 仿真实验,从理论上验证了该控制策略对并网电流 THD 具有良好的抑制作用,样机实验也再次验证了该控制策略对改善电流质量有较好的效果。

参考文献:

- [1] 王正仕,陈辉明.具有无功和谐波补偿功能的并网逆变器设计[J].电力系统自动化,2007,31(13):67-71.
- [2] 陈瑞睿.光伏并网发电系统运行技术研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [3] 马杰,张建成.光伏并网系统的谐波检测与分析[J].电网与清洁能源,2010,26(11):112-115.
- [4] 路小俊,杨雷雷,吴在军.基于无差拍控制的两级式单相光伏并网逆变器的研究[J].低压电器,2010(11):18-22.
- [5] KAWAMURA A, HANEYOSHI T, HOFT R G. Deadbeat controlled PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1988, 3(2):118-125.
- [6] QIAO W, HARLEY R G, VENAYAGAMOORTHY G K. Coordinated reactive power control of a large wind farm and STATCOM using heuristic dynamic programming [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2009, 24(2):493-503.
- [7] 全晓明,申群太.基于DSP无差拍控制的逆变电源研究[J].现代电子技术,2009(12):189-191.
- [8] 周宏斌,张帆,相中华,等.基于无差拍控制策略并联型有源滤波器的谐波抑制[J].电气开关,2009(1):59-61.
- [9] 刘胜荣,杨苹,肖莹,等.两级式光伏并网逆变器的无差拍控制算法研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(8):26-29.
- [10] 惠晶,谢伟,王思杰.光伏并网系统的数字滤波无差拍控制算法研究[J].电力电子技术,2012,46(2):52-54.
- [11] 单竹杰,林明耀,顾娟,等.单相光伏并网逆变器的无差拍控制研究[J].电工电气,2009(1):5-7.
- [12] PAPATHANASSIOU A, PAPATHANASSIOU S A, MANIAS S N, et al. Current control of a voltage source inverter connected to the grid via LCL filter[C]//Power Electronics Specialists Conference 2007. Orlando, Florida, United States: IEEE, 2007:2379-2384.
- [13] 杜金其.单相光伏并网系统谐波产生机理研究[D].重庆:重庆大学,2013.