

基于模型设计方法的两级式光伏并网系统开发

黄雷^{1,2}

(1.天津市信息传感与智能控制重点实验室,天津 300222;
2.天津职业技术师范大学 自动化与电气工程学院,天津 300222)

摘要: 为了提高光伏并网系统开发过程效率,解决DSP传统手动编程复杂、时间周期长的问题,提出了基于模型设计方法的光伏并网系统开发方法。首先在Matlab/Simulink下搭建了两级式光伏并网系统仿真模型:前级采用最大功率点追踪(MPPT)算法及Boost型DC/DC升压环节,后级采用三相全桥变流器实现有功功率及无功功率的分别调节,实现可靠并网。然后在对系统完成仿真验证的基础上,对嵌入式控制算法部分及外设建立Embedded Coder模型,实现了从Simulink模型到嵌入式代码的自动生成。最后将自动生成的代码在基于TMS320F28379D控制芯片的两级式光伏并网系统上进行了实验验证。实验结果及开发过程表明,这种基于模型设计的开发过程提升了Simulink建模的实用价值,降低了控制系统算法实现的难度,可以加速模型验证和项目开发。

关键词: 光伏并网;基于模型的设计;自动代码生成

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20271

Development of Model-based Design of Double Stage Grid Connected PV System

HUANG Lei^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing and Intelligent Control, Tianjin 300222, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of
Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Aiming at the problem of complicated and time consuming programming of DSP code in PV based grid connected inverter, a model-based design development method was proposed to improve the efficiency of the control system development. Firstly, the double stage grid connected PV inverter system was developed under Matlab/Simulink environment, with the front stage a Boost type DC/DC converter adopting maximum power point tracking (MPPT) control and the second stage a three-phase full bridge converter realizing the independent control of the active power/reactive power and grid synchronization. Secondly, after the above model being verified in system level, the Embedded Coder model of the controller algorithm and peripherals was built to realize automatic embedded code generation. At last, the automatically generated code was downloaded directly to TI DSP TMS320F28379D to perform the experimental validation of the double stage PV system. The experimental results and design procedure show that this model-based methodology can improve the feasibility of the Simulink model, lower the difficulty during the code realization process and hence accelerate the design process.

Key words: grid connected PV; model-based design; auto-code generation

传统的电力电子数字控制系统的开发一般首先基于Matlab/Simulink模型仿真验证,用于软件算法的验证,进而进行数字控制器的手动代码开发。这种方式的编程实现较为费时费力,需要

有经验的团队完成算法到实际数字控制。

MathWorks公司开发的Embedded Coder使用配置对象和系统目标文件,可将Matlab代码和Simulink模型直接转换为产品级源代码和可执行

基金项目: 天津市教委科研计划项目(JWK1617)

作者简介: 黄雷(1980—),男,博士,高级工程师,Email: lei.huang@strath.ac.uk

文件。这种基于模型的设计方法可以很大程度地提高控制算法的开发速度,减少代码编写过程中的失误,更便捷地实现设计者的想法,是一种更加便捷的开发方法^[1-4]。MathWorks公司与Texas Instruments(TI)公司联合推出的Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors支持包是针对TI公司的C2000微控制器单元,可以对控制系统软件进行设计、仿真和验证,并将其部署到TI C2000微控制器单元。

本研究针对两级式光伏并网系统,在详细分析其数学模型的基础上搭建了算法仿真模型,验证无误后利用Embedded Coder建立了针对特定硬件的模型,自动生成C实时代码直接下载到DSP中,并通过了实验验证。通过这种方法可以大大减少电力电子控制系统开发的工作量,提高效率,缩短开发周期。

1 基于模型的设计方法

基于模型设计就是要先将算法(即控制芯片的资源)模型化,让系统开发者在设计之初运用实际可行的模型进行系统测试与仿真,并生成可执行的代码。应用基于模型的设计方法首先要建立系统数学模型并通过桌面仿真验证模型,之后使用Embedded Coder从模型生成代码并将其下载到TI C2000 MCU。Embedded Coder还可以为板载外围设备生成设备驱动程序和调度程序。图1为TI C2000系列控制器的基于模型的设计方法流程。另外,在应用Embedded Coder专用支持包自动生成代码并自动下载目标程序后,还可以

实现PIL(processor-in-the-loop),即将通过外围通讯接口与光伏并网硬件实物系统联合测试,以考察通过模型设计生成的C代码在处理器上执行的正确性。

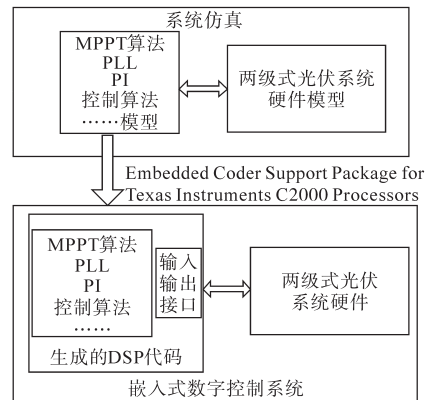


图1 基于模型的设计方法流程

Fig.1 Flow chart of model-based design method

2 系统建模及系统算法仿真

两级式光伏并网系统前级采用了Boost型升压电路,将光伏阵列发出的直流电压升压,同时实现最大功率点的跟踪。后级为三相全桥逆变器,实现并网逆变侧控制,实现有功功率 P 、无功功率 Q 的解耦控制、电网同步的锁相环(PLL)^[5-9]。

两级式光伏并网控制系统的结构图如图2所示。

2.1 最大功率追踪控制(MPPT)

由于光伏输出功率随环境条件如光照度和环境温度等影响而变化,通常采用最大功率追踪控制策略来获取最大的功率输出。本文采用扰

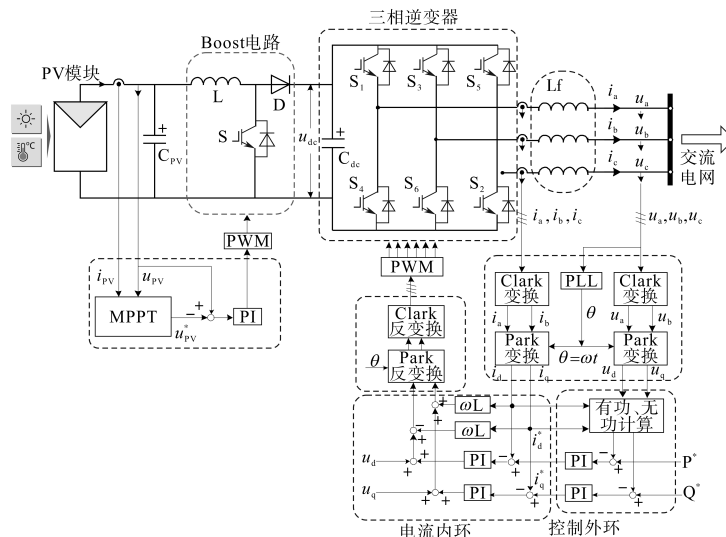


图2 两级式光伏并网系统控制结构图

Fig.2 Structure of two stage grid connected PV control system

动观察法(P&O)实现MPPT算法,其算法流程如图3所示。

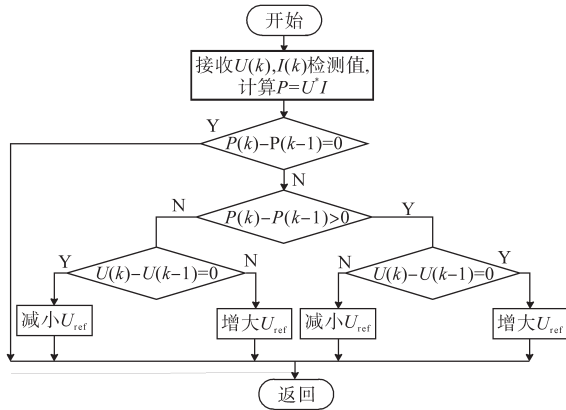


图3 扰动观察法实现MPPT的流程图

Fig.3 Flow chart of MPPT based on perturb and observe method

在Matlab/Simulink仿真模型中,上述MPPT算法是用Matlab Stateflow^[10]实现的,实现方法如图4所示。需要说明的是,在系统算法仿真建模阶段及嵌入式代码仿真及生成阶段,MPPT算法均采用该Stateflow模块。

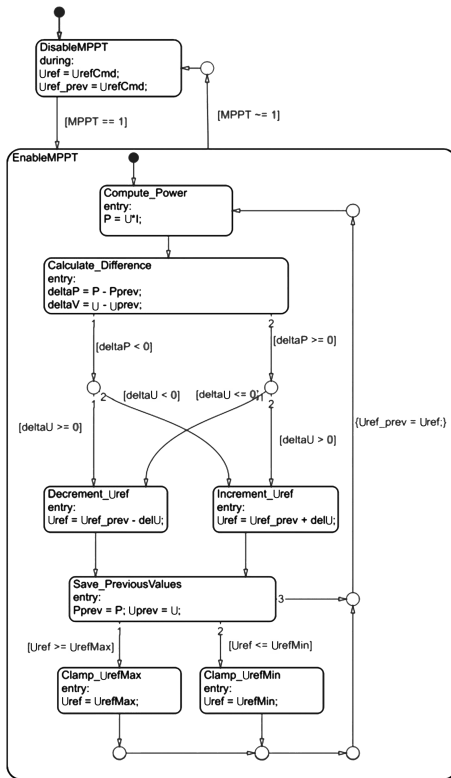


图4 扰动观察法的Stateflow实现

Fig.4 Stateflow implement of perturb and observe method

2.2 并网逆变控制

如图2所示,三相逆变器并网控制部分采用了级联控制,其中外环控制为有功功率P及无功功率Q的功率控制环,内环为电流环。

在电流内环控制中,输出电压参考值由下式给出:

$$\begin{cases} u_{d1}^* = u_{d1} + \omega L_f i_{q1} - u_d \\ u_{q1}^* = u_{q1} - \omega L_f i_{d1} - u_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{d1}^*, u_{q1}^*, u_{d1}, u_{q1}, u_d, u_q$ 分别为输出电压参考值、电流环输出值及电网电压测量值在d-q坐标系下对应的三组值; ω 为电网电压角频率; i_{d1}, i_{q1} 分别d-q坐标系下电流测量值; L_f 为滤波电感。

电流环模型可写为

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_{d1}^* \\ L_f \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_{q1}^* \end{cases} \quad (2)$$

式中: R 为滤波电感 L_f 的等效电阻值。

由式(2)可见, i_d, i_q 是解耦的,图5为三相逆变控制在d-q坐标系下的内环控制框图。

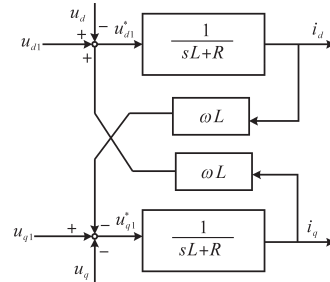


图5 三相逆变控制在d-q坐标系下的控制框图

Fig.5 Block diagram of three phase inverter in d-q reference frame

由图2两级式光伏并网系统控制结构图可知,并网逆变侧为双环控制,其中电流内环的响应要远大于功率外环。根据物理模型和上述分析,电流在d轴和q轴传递函数相同,则其控制PI设计也相同。

电流环在d-q坐标系下的模型如图6所示。由于电流在d,q轴下的两个分量动态相同,下面仅以d轴电流进行分析。

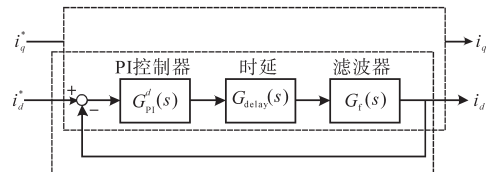


图6 同步坐标系下电流环框图

Fig.6 Black diagram of current loops in the synchronous reference frame

图6中各环节传递函数如下:

$$G_{PI}^d(s) = k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} = \frac{k_{pd}(1 + T_{id}s)}{T_{id}s} \quad (3)$$

$$G_{\text{delay}}(s) = \frac{1}{1 + 1.5T_s s} \quad (4)$$

$$G_f(s) = \frac{T_f}{L_f(1 + T_f s)} \quad (5)$$

其中

$$T_{id} = k_{pd}/k_{id} \quad T_f = L_f/R$$

式中: k_{pd}, k_{id} 分别为电流 PI 控制器的比例和积分系数; T_{id} 为积分时间常数; T_s 为采样时间; T_f 为滤波时间常数。

图 6 中的电流环控制器忽略了图 5 中的交叉耦合项 ωL 及电压前馈值, 这两项作为扰动来考虑。从而电流环的开环传递函数可描述为

$$G_{ol}^d(s) = G_{PI}^d(s) \cdot G_{\text{delay}}(s) \cdot G_f(s) = \frac{k_{pd} T_f (1 + T_{id} s)}{T_{id} L_f s (1 + 1.5 T_s s) (1 + T_f s)} \quad (6)$$

闭环传递函数为

$$G_{cl}^d(s) = \frac{G_{ol}^d(s)}{1 + G_{ol}^d(s)} = \frac{k_{pd} T_f (1 + T_{id} s)}{T_{id} L_f s (1 + 1.5 T_s s) (1 + T_f s) + k_{pd} T_f (1 + T_{id} s)} \quad (7)$$

式(7)可通过选择将积分时间常数与滤波时间常数相等得到化简, 即 $T_{id} = T_f$, 从而得到:

$$G_{cl}^d(s) = \frac{2k_{pd}}{3T_s L_f} \frac{1}{s^2 + \frac{2}{3T_s} s + \frac{2k_{pd}}{3T_s L_f}} \quad (8)$$

其中

$$\frac{2k_{pd}}{3T_s L_f} = \omega_n^2 \quad \frac{2}{3T_s} = 2\zeta\omega_n$$

式(8)描述的系统为典型二阶环节。

根据二阶系统理论^[11], 为达到较好动态性能, 选取 $\zeta = 1/\sqrt{2}$, 可得到 PI 参数:

$$\begin{cases} k_{pd} = \frac{L}{3T_s} \\ k_{id} = \frac{L}{3T_s T_f} \end{cases}$$

功率环中瞬时有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \end{cases} \quad (9)$$

假定 PLL 锁相后采用的电压定向控制中 $u_q = 0$, 从而 d, q 轴下电流与有功功率和无功功率的关系

分别为

$$\frac{P(s)}{i_d(s)} = \frac{3}{2} u_d(s) = \frac{3}{2} U_m \quad (10)$$

$$\frac{Q(s)}{i_q(s)} = -\frac{3}{2} u_d(s) = -\frac{3}{2} U_m \quad (11)$$

式中: U_m 为电网电压幅值。

由式(10)、式(11)可知, 采用开环控制即可有效控制有功和无功功率。但由于实际系统存在扰动和不确定, 从而在实际系统中通常采用闭环控制实现功率环控制, 其 PI 参数的整定可通过 Simulink 模型中 PID 模块的 Tune 功能实现。

2.3 系统算法模型

基于 MPPT 的 Boost DC/DC 及外环瞬时功率 $P-Q$ 控制与内环瞬时电流控制策略下的两级式三相光伏并网系统的整体 Simulink 控制框图如图 7 所示。算法模型建立及仿真可实现设计方案可行性的验证。

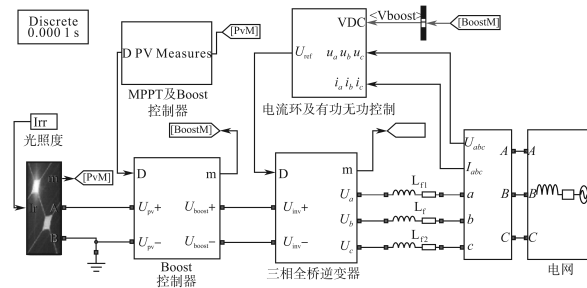


图 7 两级式光伏并网系统控制仿真模块图

Fig.7 Simulation model of two stage PV inverter system

3 嵌入式系统代码自动生成

在上述仿真模型得到仿真验证的基础上, 删除电网模型、Boost 变换器、三相全桥逆变器, 并将模型中的电压电流采样、PWM 生成、Park/Clarke 变换及其反变换等模块用 TI C2000 支持包中所提供的外设模块替换, 将所有连续模块离散化, 并设定中断时间、采样周期等关键参数, 即可得到由控制算法及 DSP 外设功能模块构成的 Embedded Coder 建模模型, 如图 8 所示。

模型搭建完毕后还需对指定生成代码所对应的硬件以及代码进行设置, 如代码类型及风格的选择等。在代码生成阶段, Simulation 选项提供的 Configuration Parameters 能够进行参数设置。Hardware Implementation 选项提供硬件平台选择, Code Generation 提供目标文件格式选择,

如图9、图10所示。

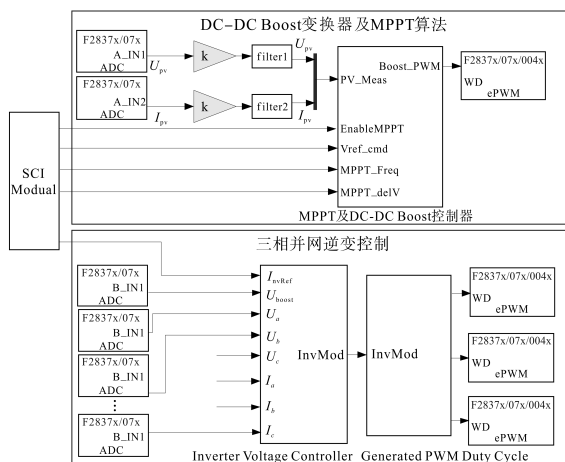


图8 控制算法及DSP功能模块的Embedded Coder建模
Fig.8 Modeling of control algorithm and DSP peripherals using Embedded Coder

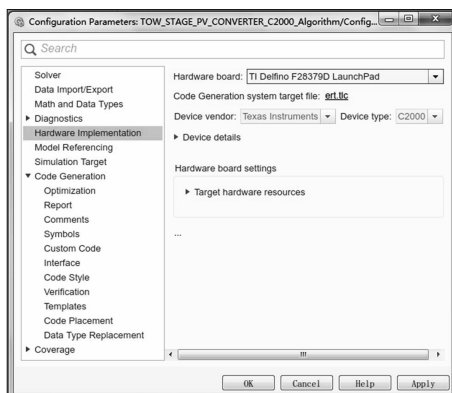


图9 参数设置中的硬件选型
Fig.9 Hardware configuration in parameter configuration

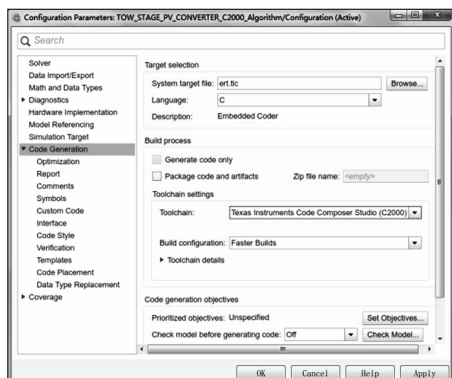


图10 参数设置中输出代码相关配置
Fig.10 Code generation in parameter configuration

完成上述设置后在模型窗口选择点击Deploy to Hardware (部署到硬件)后 Simulink 完成编译链接后将自动调用 Code Composer Studio, 生成可执行代码.out文件并下载到DSP。整个过程无需手动编程,且无需在 Code Composer Studio中建立 project(工程)。

4 实验验证

为了验证所设计光伏并网控制器的动态响应性能及生成代码的可行性,在光伏实验系统进行实验验证。控制器采用TI TMS320F28379D,该芯片为TI的32位C28x双核浮点CPU,其性能通过新型TMU加速器和VCU加速器得到了进一步提升,可快速执行包含变换的计算中常见的三角运算的算法,并缩短编码应用中常见的复杂数学运算的时间。实验验证阶段通过可编程电源对实际光伏阵列进行模拟,采用3组光伏阵列并联运行。实验系统参数如下:单个PV最大输出功率 $P_{mpp} = 300\text{ W}$, Boost电感 $L = 1.5\text{ mH}$, PV侧输出电容 $= 220\text{ }\mu\text{F}$, 三相逆变器直流侧电压 $U_{dc} = 450\text{ V}$, 网侧电压幅值 $U_{gm} = 325\text{ V}$, 网侧电压频率 $\omega_0 = 314\text{ rad/s}$, 网侧滤波电感 $L_g = 4\text{ mH}$ 。

设0时刻无功功率指令值为0 var, 稳定运行后,在0.2 s时无功功率突变为700 var。图11为通过控制器在环(PIL)方法从光伏并网系统实际输出获取的波形,从上到下分别为:无功功率输出、光伏阵列输出功率、光伏输出经Boost升压后的电压、A相电压及A相并网电流。

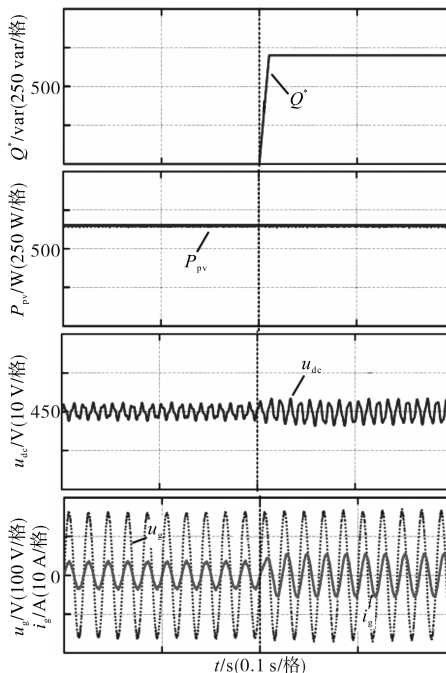


图11 无功指令变换时光伏并网输出波形
Fig.11 Output waveforms of grid connected PV system under reactive change condition

从图11中可知,在无功功率给定发生突变时,三相并网逆变器的并网电流也相应发生突变,并在短的时间内迅速、准确恢复正弦运行,具

有较好的电流和功率控制性能;同时 DC-link 电压的波动在 ± 5 V 以内,波动幅度为 1.1%(标称电压 450 V),为可接受的范围。

图 12 为无功功率指令 0 var,系统作为单位功率因数运行时用示波器测得的 A 相并网电流跟踪电网电压波形,可见电流波形正弦度很好,且保证了功率因数为 1。实验结果表明,并网系统可实现功率解耦控制,为电网提供安全可靠的电能。

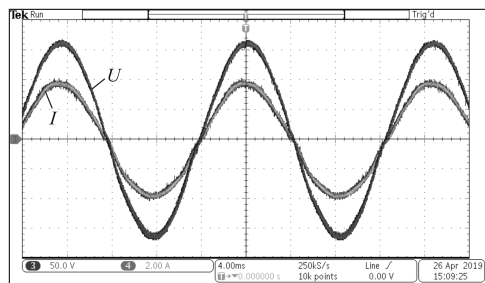


图 12 A 相电压及电流波形

Fig.12 Voltage and current waveforms of phase A

5 结论

本研究实现了两级式光伏并网系统的 MPPT 算法及有功功率、无功功率的解耦控制从算法设计到最终实现的开发过程。通过 Simulink 模型的自动代码生成,开发人员可以专心致力于优化算法的开发和系统性能的提高,避免了人工编写程序代码,从而缩短了测试及开发周期,同时对两级式光伏并网系统进行了详细的数学建模、仿真和实验验证。这种基于模型设计的开发方式

为基于 DSP 的电力电子系统开发提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 武琼,漆星,王群京,等.基于 DSP 代码自动生成的 SVPWM 算法的研究[J].电气传动,2013,43(10):32-35.
- [2] 李哲帅,周文华,聂飞.基于模型的 HEX 自动生成工具的开发与应用[J].机电工程,2018,35(8):886-891.
- [3] 刘杰.基于模型的设计及其嵌入式实现[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [4] 张真真.基于模型设计的 DSP 异步电动机直接转矩控制[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [5] 高文祥,王明渝,王立健,等.光伏微型逆变器研究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(21):147-155.
- [6] 赵晋斌,张元吉,屈克庆,等.单相 LCL 并网逆变器控制策略综述[J].电工技术学报,2013,28(10):134-142.
- [7] Samir Kouro, Jose I Leon, Dimitri Vinnikov, et al. Grid-connected Photovoltaic Systems: an Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2015, 9(1): 47-61.
- [8] 任碧莹,郝金莉,孙向东,等.一种新颖的两级式光伏并网控制方法[J].电气传动,2016,46(7):61-65.
- [9] 赵建荣,王林,张海龙,等.基于偏差控制的两级式光伏系统有功调度策略[J].电气传动,2017,47(5):54-57.
- [10] 王蓓,赵廷弟.应用 Stateflow 技术的安全性建模与仿真[J].北京航空航天大学学报,2011,37(11):1415-1420.
- [11] Gene F Franklin, J D Powell, Abbas F Emami-Naeini. Feedback Control of Dynamic Systems (8th Edition) [M]. New York: Pearson, 2008.

收稿日期:2019-05-15

修改稿日期:2019-06-18