

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.024

基于数模混合控制的快速光伏模拟器

谷 叶, 邓 焰*, 李广地, 王 昆
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对目前光伏电池最大功率点跟踪(MPPT)算法扰动频率越来越高的问题,设计了一种基于数模混合控制的快速光伏模拟器。模拟器的数字部分采用数字信号处理器(DSP)实现,所提出的算法首先使用四段折线法拟合光伏电池的伏安特性曲线,线性化的拟合结果可简化运算过程;接着采样输出电压、电流,计算出了负载阻抗;最后利用负载阻抗定位法,只用一个运算周期确定光伏模拟器的静态工作点。模拟部分主功率电路为同步BUCK,控制算法采用峰值电流控制以提高电路的响应速度,且其输出电压和电流可跟踪数字部分输出的具有光伏特性的参考值。建立模型分析模拟器的响应时间为0.22 ms,满足光伏逆变器的MPPT算法要求。仿真和实验结果表明,理论分析准确,所设计的光伏模拟器具有实用性。

关键词: 光伏模拟器; 快速最大功率点跟踪(MPPT); 数模混合控制; 动态响应

中图分类号: TM61; TH74; TP272 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0517-05

Fast photovoltaic simulator based on D/A mixed control

GU Ye, DENG Yan, LI Guang-di, WANG Kun

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

Abstract: Aiming at the increasing perturbation frequency in maximum power point tracking(MPPT)algorithms, a photovoltaic simulator is designed with digital/analog mixed control. The digital part of the simulator was realized by a digital signal processor (DSP), which adopts the four-segment piecewise linear fitting method to build the photovoltaic characteristic curve and uses the load impedance location method to find the accurate steady-state operation point within only one calculation cycle. In the analog part, the power converter was realized by using a peak current controlled synchronous BUCK, whose output voltage and current follows the photovoltaic reference value produced by the digital part. The model of the simulator was built to analyze its response time, which is about 0.22 ms and meets the requirements of the photovoltaic inverters' MPPT algorithms. The results of simulation and emperments indicate that the theoretical analyses are accurate and the proposed simulator is feasible.

Key words: photovoltaic simulator; fast maximum power point tracking(MPPT); digital/analog mixed control; dynamic response

0 引 言

光伏电池的输出特性为非线性,具有最大功率点(MPP)^[1],因此光伏电池变流器通常采用MPPT算法提高能量利用率^[2]。若直接用光伏电池来调试MPPT算法,一方面安装成本高、占地面积大,且做实验时需进行串、并联调整,耗费人力物力;另一方面光伏电池的

输出特性与光照强度、环境温度等相关,因而实验结果可复现性差^[3]。故有必要研发设计一种光伏模拟器模拟光伏电池特性,加速光伏变流器的研发工作。

光伏模拟器不仅应具有与光伏电池足够相近的静态特性,还应具备合理的响应速度,因为在配合后级MPPT算法调试时,只有在MPPT的两次扰动时间间隔内输出达到稳态,才能不影响后级变流器的MPPT动作。近年来为获得更快的最大功率点跟踪速度,提高

收稿日期: 2013-12-02

作者简介: 谷 叶(1989-),女,河北石家庄人,主要从事光伏模拟器、光伏功率优化器、MPPT算法、电力电子技术方面的研究。E-mail:gyjoanna@126.com.

通信联系人: 邓 焰,男,副教授,硕士生导师。E-mail:dengyan@zju.edu.cn

MPPT总效率^[4], MPPT算法的扰动频率越来越高^[5-6], 如NI公司的SM3320-1A1型号光伏电源优化器其扰动频率就在1 kHz左右。大多数对光伏模拟器的研究都忽视了响应速度的保证^[7-8], 响应时间在50 ms~1 s之间, 因此不能适应高扰动频率MPPT算法的调试。

本研究设计一种基于数模混合控制的快速光伏模拟器。数字控制部分采用四段折线拟合法建立光伏数学模型, 采样输出电压、电流计算负载阻抗, 并利用负载阻抗定位法求取光伏模拟器的静态工作点; 模拟部分快速跟踪数字控制给定的静态工作点, 使得主功率电路输出具有光伏特性。理论分析、仿真和实验结果表明, 该装置的单次扰动动态调整时间在0.22 ms, 证明所设计的模拟器能够适用于快速MPPT算法和产品的辅助研究测试。

1 系统方案及动态响应时间分析

光伏模拟器设计方案示意图如图1所示, 光伏模拟器系统主要包括数字算法、数模转换电路、模拟算法和主功率电路4个部分, 这4个部分共同决定了系统的响应时间。

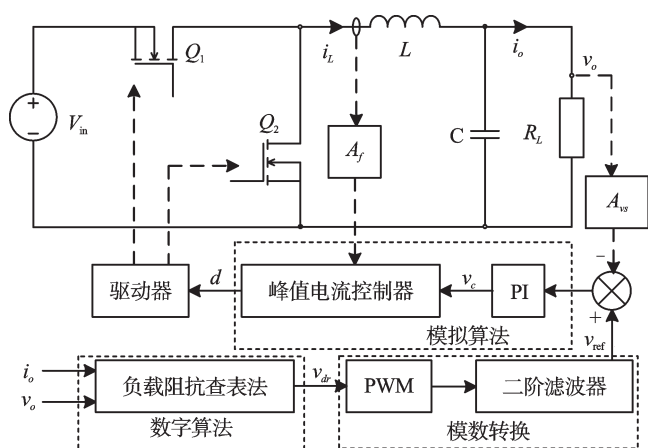


图1 光伏模拟器设计方案示意图

数字算法部分采用DSP实现, 采样当前周期主功率电路的输出电压 v_o 以及输出电流 i_o , 根据光伏特性数学模型计算出模拟器下个周期的输出电压参考值, 并在经过数/模转换电路后输入模拟算法部分。模拟算法部分采用峰值电流控制, 调节主功率BUCK电路输出电压, 该输出电压调节到稳态值后, 模拟器的输出 v_o 和 i_o 即位于所模拟的光伏特性曲线上。

1.1 数字控制算法设计

数字控制算法包括两方面内容, 一是光伏电池输出 $I-V$ 特性的拟合; 二是计算出模拟器的主功率静态工作点^[9]。

为了缩短软件运算时间, 该设计采用四段折线法

拟合光伏电池数学模型^[10]。定义 V_{mpp} , I_{mpp} 分别为光伏特性曲线最大功率点的电压和电流, V_{oc} , I_{sc} 分别为开路电压和短路电流。

四段折线拟合的光伏数学模型如图2所示, 本研究在光伏特性曲线上选择5个点, 分别为 $(0, I_{sc})$ 、 $(0.9V_{mpp}, I_1)$ 、 (V_{mpp}, I_{mpp}) 、 $(1.1V_{mpp}, I_2)$ 、 $(V_{oc}, 0)$, 相邻点之间以直线段相连。构成的四段折线可用于拟合真实的光伏特性曲线, 并且拟合的曲线与原曲线在 $0.9V_{mpp}$ 和 $1.1V_{mpp}$ 区间的最大误差不超过3%。因模拟器主要工作在最大功率点附近, 拟合的特性曲线满足对光伏模拟器的精度要求。

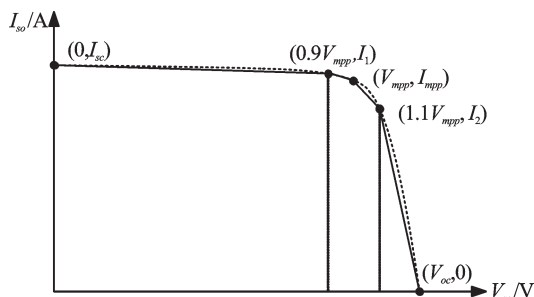


图2 四段折线拟合的光伏数学模型

拟合后的光伏特性曲线方程见公式(1):

$$\begin{cases} I_{so} = \frac{I_1 - I_{sc}}{0.9V_{mpp}} \times V_{so} + I_{sc}, & V_{so} \in [0, 0.9V_{mpp}] \\ I_{so} = \frac{I_{mpp} - I_1}{0.1V_{mpp}} \times V_{so} - 9I_{mpp} + 10I_1, & V_{so} \in [0.9V_{mpp}, V_{mpp}] \\ I_{so} = \frac{I_2 - I_{mpp}}{0.1V_{mpp}} \times V_{so} + 11I_{mpp} - 10I_2, & V_{so} \in [V_{mpp}, 1.1V_{mpp}] \\ I_{so} = \frac{-I_2}{V_{oc} - 1.1V_{mpp}} \times V_{so} + \frac{I_2 V_{oc}}{V_{oc} - 1.1V_{mpp}}, & V_{so} \in [1.1V_{mpp}, V_{oc}] \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{so} , I_{so} —曲线上电压和电流。

拟合的曲线电压和电流在各段中为线性关系, 有利于减少DSP的计算量, 提高系统响应速度。

该设计使用阻性负载模拟光伏模拟器负载^[11-13], 阻性负载的伏安特性是一条经过原点的直线, 负载阻抗值决定了直线的斜率, 并与光伏特性曲线有不同的、单一的交点。负载阻抗-光伏参考电压关系图如图3所示, 图3中 R_{L1} 、 R_{L2} 与曲线的交点分别为A、B, 对应这个负载条件下光伏模拟器的静态工作点。折线法选择的5个点对应阻值由小到大分别为0、 $0.9V_{mpp}/I_1$ 、 V_{mpp}/I_{mpp} 、 $1.1V_{mpp}/I_2$ 和无穷大, 将光伏特性曲线分成了4个阻抗区域I、II、III和IV, DSP利用这个4个区域与公式(1)快速定位模拟器工作点。

如图3所示, 假设某个时刻模拟器负载由 R_{L1} 变成 R_{L2} , 此时模拟器输出电压保持不变, 模拟器的工作点

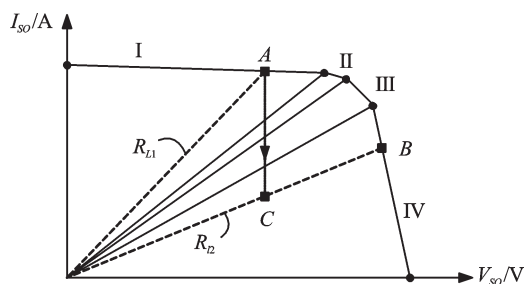


图3 负载阻抗-光伏参考电压关系图

为 C ; DSP 采样到当前负载电压 v_o 和电流 i_o 后,计算出负载阻抗,通过查表确定 C 点位于区间 IV,并根据公式(1)找到负载伏安特性与所拟合光伏特性曲线的交点 B ;将 B 点电压输入到模拟控制电路,当主功率电路跟踪该电压值并达到稳态后,光伏模拟器的输出电压电流即位于光伏特性曲线上。这种算法简称为负载阻抗定位法,其优势是:对于每一次 MPPT 扰动后导致的模拟器输出电压电流偏离光伏特性曲线现象,只需一次动态过程,即可调整正确。

本研究利用四段折线拟合法和负载阻抗定位法结合的算法,简化了 DSP 求取模拟器静态工作点的过程,减少了软件延迟时间。实验选用的 DSP 主频率为 60 MHz,程序使用了 IQmath 库进行乘除法运算,每个求解周期包括 1 次定点乘法运算,2 次定点除法运算,以及 6 次定、浮点之间的转换运算。经测试, DSP 完成一次采样和求解新静态参考工作点的运算时间仅为 0.02 ms。

1.2 主功率电路及其控制算法

对主功率电路及其控制算法的要求是快速跟踪数字算法部分给出的参考电压。同时考虑到成本和实用性,模拟器采用传统的电压外环和电流内环的峰值电流控制同步 BUCK,如图 1 所示。该主功率电路拓扑具有结构简单、可靠性高、输出电压纹波小等优点;而峰值电流控制算法暂态响应快,控制电路容易设计,且其逐周期峰值电流功能能够可靠保护模拟电路和负载。

为了分析主功率电路及其控制算法的时间开销,须建立其小信号模型。首先忽略电感电流纹波的影响,可推导出电流内环传递函数如下式所示:

$$G_{ic}(s) = \frac{v_o(s)}{v_c(s)} = \frac{R_L}{A_f(1 + sCR_L)} \quad (2)$$

式中: $v_o(s)$ —输出电压; $v_c(s)$ —内环电流参考; A_f —电感电流采样比例; C , R_L —输出电容和负载电阻。

接着加入电压外环,获得峰值控制 BUCK 的传递函数如下式所示:

$$G_{main}(s) = \frac{v_o(s)}{v_{ref}(s)} = \frac{(K_p + K_i/s) \cdot G_{ic}(s)}{1 + (K_p + K_i/s) \cdot G_{ic}(s) \cdot A_{fs}} \quad (3)$$

式中: $v_{ref}(s)$ —电压外环参考电压, K_p —PI 的比例系数, K_i —积分系数, A_{fs} —输出电压采样比例系数。

1.3 数/模转换和响应时间

为了提高 DSP 的型号可选择性和简化系统设计,数字和模拟电路接口数/模转换电路实现方法如图 1 所示,本研究利用 DSP 的 PWM 引脚将数字参考电压 v_{dr} 变成占空比与之成正比的 PWM 信号 v_{PWM} ,并输入二阶低通滤波器变成平直电压,其中 v_{dr} 转换为 PWM 信号的响应时间可以忽略。

二阶低通滤波器如图 4 所示,传递函数表达式见式(4),为简化设计,令 R_1 、 R_2 、 R_3 相等, C_1 和 C_2 相等。 v_{PWM} 频率为 200 kHz,选择二阶滤波器的截止频率 $f_n = 1/(2\pi R_1 C_1)$ 为 10 kHz,保证模拟算法部分参考电压 v_{ref} 纹波足够小。

$$G_{filter}(s) = \frac{v_{ref}}{v_{PWM}} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_2 C_1 + R_1 C_2) s + 1} \quad (4)$$

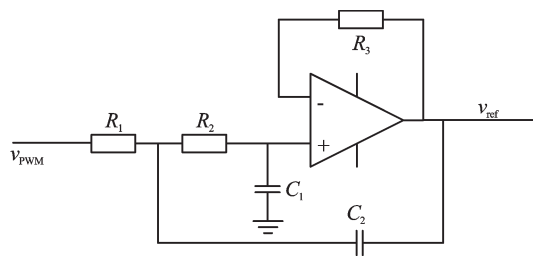


图4 压控型有源二阶低通滤波电路

根据公式(3,4),可写出从 DSP 参考电压 v_{dr} 到主功率输出电压 v_o 的传递函数如下式所示:

$$G_h(s) = \frac{v_o(s)}{v_{dr}(s)} = G_{main}(s) \times G_{filter}(s) \quad (5)$$

本研究定义 $G_h(s)$ 的响应时间为参考电压 v_{dr} 发生阶跃变化后, v_o 达到其新稳定值的 95% 所需要的时间。光伏模拟器各参数如表 1 所示,通过 Matlab 仿真测试出最大功率点对应电阻 $R_L = 2.78 \Omega$ 时 $G_h(s)$ 的响应时间约为 0.2 ms。结合 1.1 节分析结果,计算出模拟器系统的响应时间为 0.22 ms,即负载发生突变后,光伏模拟器需要 0.22 ms 才能重新将其输出调整到光伏特性曲线上。这个时间已经能够满足 NI 公司 SM3320-1A1 型号光伏电源优化器的要求。

2 仿真与实验验证

为了验证理论分析的正确性,本研究使用 Matlab 对整个光伏模拟器进行仿真验证,相关仿真参数如表 1 所示。

仿真电路如图 5 所示,图 5 中, SW 开关模拟负载突变; DSP 模块输出后的 0.02 ms 延时环节代表数字算法部分延时。

表1 光伏模拟器相关参数

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
V_{oc}	16 V	V_{in}	20 V	A_f	0.137 5
I_{sc}	5.1 A	L	20 μ H	A_{is}	0.1
V_{mpp}	12.8 V	C	14.1 μ F	K_p	1.5
I_{mpp}	4.6 A	R_L	0.5 Ω ~10 Ω	K_i	30 000
		f_s	200 kHz		

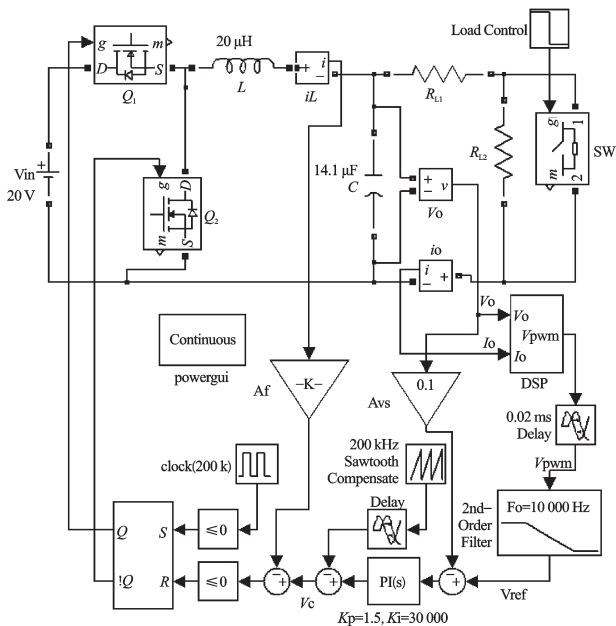


图5 光伏模拟器Simulink仿真

负载阻抗由1.2 Ω 突变至3.2 Ω 的仿真波形图如图6(a)所示,对应光伏特性曲线电压分别为6 V和13.6 V,模拟器响应时间约为0.22 ms,与理论分析一致。负载阻抗由2.3 Ω 突变至6.3 Ω 的仿真波形图如图6(b)所示,对应光伏特性曲线电压分别为10.8 V和15.2 V,模拟器响应时间约为0.16 ms,与理论分析的0.22 ms有差距,原因在于负载阻抗变化改变了 $G_h(s)$ 的响应时间。在2.3 Ω 和6.3 Ω 之间取 $R_L=4 \Omega$,仿真出 $G_h(s)$ 的响应时间为0.13 ms,则系统总响应时间为0.15 ms,与仿真结果一致。

系统仿真响应时间与前述理论分析结果接近,证明所提出模拟器的可行性和理论分析的正确性。

笔者搭建实际电路验证理论分析和仿真的准确性,实验参数如表1所示,首先验证光伏模拟器的静态输出特性,接着测试其响应时间。

通过设置不同的负载,可测得模拟器一系列的静态输出工作点。光伏模拟器实验测量工作点如图7所示,菱形散点表示实验所得的光伏模拟器输出工作点,实线则代表利用四段折线法拟合得到的理论光伏数学模型,两者的充分拟合表明所设计的光伏模拟器能够较精确地模拟光伏电池的静态工作特性。

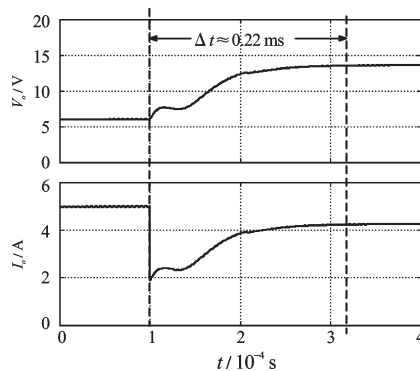
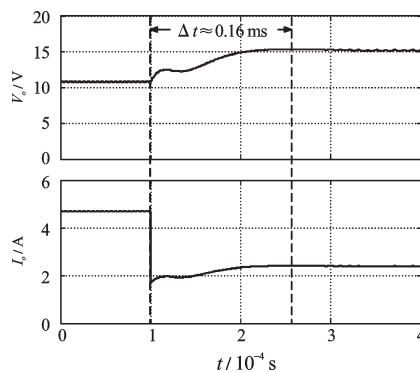
(a) 负载由1.2 Ω 跳变为3.2 Ω (b) 负载由2.3 Ω 跳变为6.3 Ω

图6 光伏模拟器的Matlab仿真动态波形

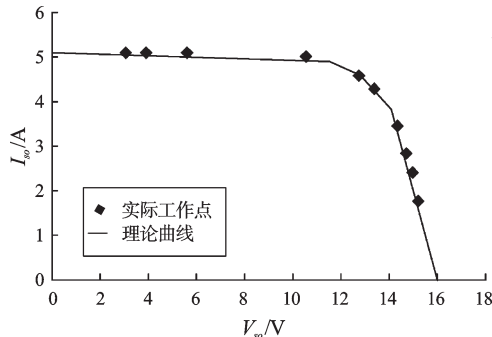


图7 光伏模拟器实验测量工作点

负载阻抗跳变时光伏模拟器的输出动态实验波形如图8所示,负载阻抗由1.2 Ω 突变至3.2 Ω ,整个动态过程耗时约0.23 ms(如图8(a)所示)。负载阻抗由2.3 Ω 突变至6.3 Ω (如图8(b)所示),整个动态过程耗时约0.17 ms。

比较仿真和实验的动态响应波形可见,两者的过渡过程和恢复时间一致,证明了理论分析和仿真结果的准确性,以及所设计的模拟器的可行性。

3 结束语

本研究提出一种基于数模混合控制的快速光伏模拟器。数字控制算法使用四段折线法拟合光伏电池数学模型,并结合负载阻抗定位法求解模拟器的静

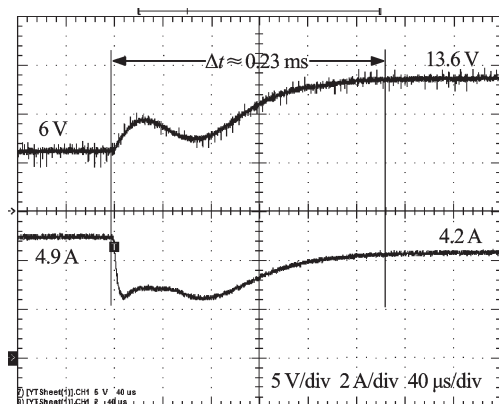
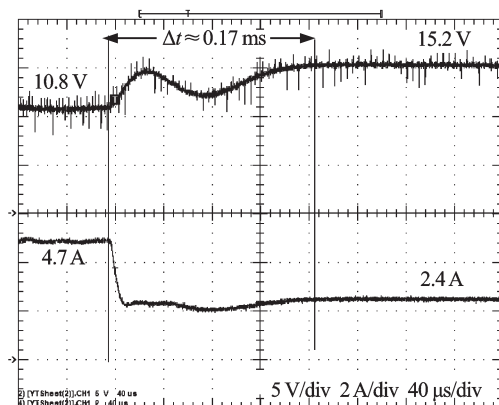
(a) 负载由 1.2 Ω 跳变为 3.2 Ω (b) 负载由 2.3 Ω 跳变为 6.3 Ω

图8 光伏模拟器实测动态特性波形图

态工作点,减少了软件计算时间;主功率电路及其控制算法采用峰值电流模式控制的同步BUCK。通过建立数学模型分析了模拟器的响应时间,并进行了仿真和实验验证。仿真结果、实验波形与理论分析一致,证明该光伏模拟器不仅能够模拟光伏电池的静态输出特性,还具有良好的响应速度,能够满足后续光伏变流器在调试快速扰动的MPPT算法时的动态要求。

参考文献(References):

- [1] 茅倾青,潘立栋,陈骏逸,等. 太阳能电池基本特性测定实验[J]. 物理实验,2004,24(11):6-8,11.

- [2] 陈亚爱,师宇腾,闫德刚,等. 太阳能光伏阵列模拟器综述[J]. 电源技术,2012,36(2):286-289.
- [3] 俞天艺,杨 鹏,刘 松. 基于DC/DC变换的光伏系统最大功率跟踪系统仿真[J]. 机电工程,2011,28(10):1281-1283,1290.
- [4] BIANCONI E, CALVENTE J, GIRA R, et al. A fast current-based mppt technique employing sliding mode control [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013, 60(3):1168-1178.
- [5] ZENG Qing-rong, CHANG Liu-chen, SHAO Ri-ming. Fuzzy-logic-based Maximum Power Point Tracking Strategy for Pmsg Variable-speed Wind Turbine Generation Systems[C]//Electrical and Computer Engineering. Canada: [s. n.], 2008:405-409.
- [6] ALAJMI B N, AHMED K H, FINNEY S J, et al. Fuzzy-logic-control approach of a modified hill-climbing method for maximum power point in microgrid standalone photovoltaic system [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2011, 26(4):1022-1030.
- [7] 王付胜,文家燕,张 兴,等. 数字式光伏阵列模拟器的研究[J]. 太阳能学报,2012,33(3):494-499.
- [8] CIPRIANI G, DIO V D, NOIA L P D, et al. A PV Plant Simulator for Testing MPPT Techniques[C]//Clean Electrical Power(ICCEP). Alghero: [s. n.], 2013:482-489.
- [9] 冯 玉,周 林,傅 望,等. 光伏阵列模拟器综述[J]. 电气传动,2011,41(11):3-7.
- [10] ABIDI H, BENNANI BEN ABDELGHANI A, MONTESINOS-MIRACLE D. MPPT Algorithm and Photovoltaic array Emulator using DC/DC Converters[C]//Electrotechnical Conference(MELECON). Yasmine Hammanmet: [s. n.], 2012:567-572.
- [11] 韩 雄,韩肖清,朱 旋,等. 基于PXI和LabVIEW的光伏电池模拟器的设计[J]. 华东电力,2012,40(5):882-884.
- [12] 杨文燮,王 雨,费 科. 基于Matlab的高精度光伏模拟器的设计[J]. 电气传动自动化,2012,34(6):44-47.
- [13] CHANG C H, CHANG E C, CHENG H L. A high-efficiency solar array simulator implemented by an LLC resonant DC-DC converter[J]. **IEEE transactions on Power Electronics**, 2013, 28(6):3039-3046.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

谷 叶,邓 焰,李广地,等. 基于数模混合控制的快速光伏模拟器[J]. 机电工程,2014,31(4):517-521.

GU Ye, DENG Yan, LI Guang-di, et al. Fast photovoltaic simulator based on D/A mixed control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(4):517-521.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>