

# 基于 RTDS 的光伏并网数字物理混合实时仿真平台设计

陈侃, 冯琳, 贾林壮, 李国杰, 莫光玲

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 作为清洁的可再生能源, 太阳能光伏发电已成为国内可再生能源发展战略的重要内容。运用数字物理混合的硬件在环仿真方法对光伏并网系统的特性进行研究, 能够提供便捷的实验条件和准确的实验结果。基于RTDS(Real Time Digital Simulator)实时仿真系统, 通过其数模接口同外部DSP构成数字物理闭环, 设计了一种光伏并网系统的硬件在环仿真平台, 建立了容量为520 kWp的光伏并网系统, 实现了最大功率跟踪和并网控制的功能。最后对RTDS系统内的闭环仿真结果进行了分析, 验证了所提出的数模混合硬件在环实时仿真方法的可行性和有效性。

**关键词:** RTDS; 实时仿真; 光伏并网系统; 硬件在环仿真

## Design of digital/physical hybrid simulation platform for photovoltaic grid-connected system based on RTDS

CHEN Kan, FENG Lin, JIA Lin-zhuang, LI Guo-jie, MO Guang-ling

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As one important kind of renewable energy, solar energy has become a key factor of Chinese renewable energy developing strategy. Research on the characteristic of PV grid-connected system by hardware-in-the-loop simulation could provide convenient experiment condition and accurate result. This paper builds a digital/physical hybrid simulation platform based on RTDS and establishes a 520 kWp PV grid-connected system, in which maximum power point tracking (MPPT) and grid-connected control are achieved. At last, the feasibility and effectiveness of hybrid PV system are validated by the analysis of hardware-in-the-loop result in RTDS.

**Key words:** RTDS; real-time simulation; PV grid-connected system; hardware-in-the-loop simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0042-07

## 0 引言

在众多可再生能源中, 太阳能凭其独特的优点而受到一致青睐, 光伏发电已成为国内可再生能源发展战略的重要内容<sup>[1]</sup>。但由于其不同于常规电源的发电特点, 输出功率波动较大, 光伏发电系统的建模与仿真研究成为光伏发电领域的重要课题<sup>[2-3]</sup>。

机电暂态或者电磁暂态数字仿真只能对特定的现象和范围进行仿真分析, 面对快速发展的现代电力系统, 经常难以描绘和分析一些新现象和新问题; 传统的物理实验能够比较准确地模拟实际情况,

但其存在建设投资巨大、参数更改困难、模拟规模有限等不足。数字混合仿真技术在一定程度上可以弥补这两种方法的不足, 它拓宽了电力系统数字仿真技术的研究范围, 同时也成为该领域的热点和前沿问题之一<sup>[4]</sup>。

目前, 国内外关于数字物理系统的混合实时仿真技术的应用主要集中在交直流高压输电、电力电子设备特性研究以及可再生能源发电研究等方面。在交直流高压输电方面, 文献[5]基于功率连接技术搭建了适用于交直流大电网仿真的数模混合仿真平台, 实现了高压直流输电一次设备与数字大电网的数字物理混合仿真; 文献[6]采用Hypersim全数字实时仿真软件, 通过信号接口和功率接口实现了全数字仿真程序与一次直流物理仿真装置和二次控制保

**基金项目:** 上海市科委资助项目(11dz1210402); 国家科技支撑计划课题(2013BAA01B04); 国家自然科学基金资助项目(51307106)

护装置的互联,基于SGI超级计算机实现了大规模交直流电网的数模混合实时仿真。在电力电子设备特性研究方面,文献[7]通过硬件在环仿真,对电力电子系统中的反馈电流滤波器特性进行了详细的分析和研究。在可再生能源发电的研究方面,文献[8]基于RTDS系统,设计了双馈风电机组的信号型D/PHS方案,给出了数模仿真系统和变流器控制系统的开发细节。关于光伏发电的硬件在环仿真国内相关研究进行的比较少,国外进行了一些相关的研究,文献[9-10]运用RT-LAB实时仿真平台建立光伏模拟器的实时仿真模型,并分别进行了硬件在环和快速控制模型的建模和实验;文献[11]通过硬件在环的仿真手段,搭建了测试光伏电池板特性的混合实验平台,并且结合RT-LAB和Matlab/Simulink对实验结果进行校正;文献[12]基于RTDS平台研究了光伏系统的低电压穿越技术,但并未引入硬件在环混合仿真手段。

本文基于RTDS设计了一种光伏并网数字物理混合实时仿真平台,RTDS通过数模接口与外部DSP设备连接构成数字物理的硬件在环系统。在该平台上实现了容量为520 kW<sub>p</sub>的光伏系统的最大功率跟踪和并网控制,并且通过数字物理闭环仿真,验证了光伏并网系统最大功率和并网控制的效果。

## 1 光伏并网系统建模

光伏并网发电系统结构示意图如图1所示,光伏阵列将光能转化为电能,通过光伏并网逆变器将直流电转化为交流电之后并网。整个系统的技术难点在于光伏系统发出的电能并网时,对于其电能质量有着较高的要求,频率、谐波、稳定性等参数都需要满足分布式发电并网标准<sup>[13]</sup>。

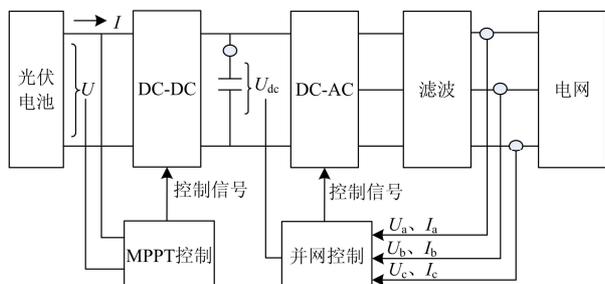


图1 光伏并网发电系统结构图

Fig. 1 PV grid-connected power generation system

### 1.1 光伏电池建模

光伏电池的等效电路如图2所示<sup>[14]</sup>,电路由可控电流源、二极管、并联电阻和串联电阻组成。

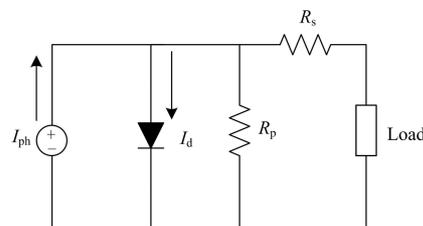


图2 光伏电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of PV battery

光伏电池的输出电流可以作为其输出电压的函数,如式(1)。

$$I = I_{ph} - I_d \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s I)}{A k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

式中:  $V$  和  $I$  为光伏电池的输出电压和电流;  $I_{ph}$  为由光照强度决定的短路电流;  $I_d$  为流过二极管的电流;  $R_s$  为实际串联阻抗;  $R_p$  为实际并联阻抗;  $q$  为电子电量;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为温度;  $A$  为二极管理想因子。

实际应用中,光伏电池串并联组成光伏组件,光伏组件再经过串并联组成光伏阵列。一个由  $N_{sm} \times N_{pm}$  个光伏组件(其中  $N_{sm}$ 、 $N_{pm}$  分别为光伏组件的串、并联数)组成的光伏阵列的输出特性为

$$I = N_{pm} I_{scM} - \frac{N_{pm} I_{scM}}{\exp \left( \frac{q V_{ocM}}{N_s k T} \right) \left[ \exp \left( \frac{q (V_A + R_{sA} I_A)}{A k T N_s N_{sm}} \right) - 1 \right]} \quad (2)$$

其中:  $I_{scM}$  和  $V_{ocM}$  分别为光伏阵列的短路电流和开路电压;  $R_{sA}$  为光伏阵列的等效阻抗。

### 1.2 DC-DC部分建模

为了提高光伏发电系统的效率,通常需要对光伏电池进行最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制。DC-DC变换器通过改变功率开关管控制信号(PWM)的导通率(占空比)来调整和控制光伏电池工作在最大功率点,实现MPPT。MPPT的实质是一个动态自寻优过程,通过对光伏阵列当前输出电压与电流的检测,得到当前光伏阵列输出功率,再与前一时刻的光伏阵列输出功率相比较,使得阵列动态地工作在最大功率点<sup>[15]</sup>。

本文的混合仿真系统中采用的MPPT方法是电导增量法,其计算流程如图3所示。

### 1.3 DC-AC部分建模

文献[16]提出采用PQ控制将光伏发电系统接入大电网,当逆变器接入大电网后,逆变器的输出



以对光伏并网电压电流、光伏发电系统发出有功无功等进行计算分析。

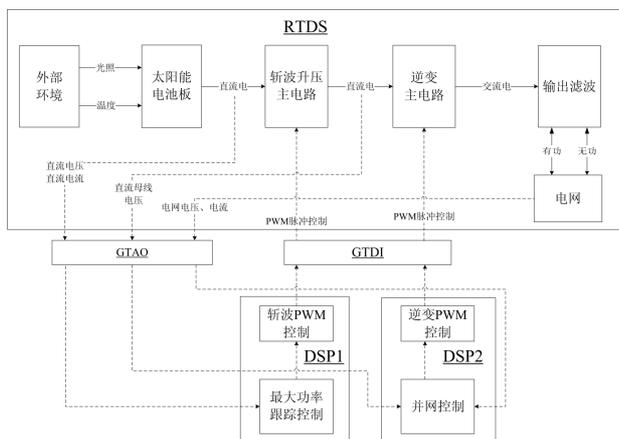


图 6 硬件在环混合仿真系统架构图

Fig. 6 Framework of hardware-in-loop simulation system

### 3 光伏并网混合系统计算资源分配

本文建立的光伏并网数字物理混合系统，需要 RTDS 实时仿真器和两块 DSP 一起进行混合仿真。RTDS 平台内需要三块 GPC 计算卡，对光伏系统在 RTDS 内建模的部分进行实时运算，其计算资源分配情况如图 7 所示。其中在 GPC1 中进行的是小步长电压源器件的网络计算，GPC2A 中对控制部分进行计算，GPC2B 中进行的是系统整体网络潮流运算，GPC3 中进行光伏电池板和电源部分的计算。

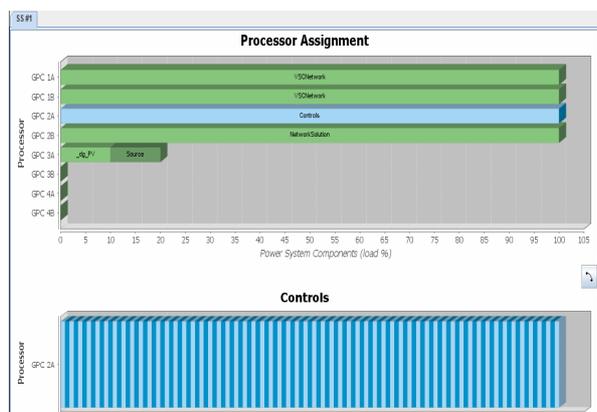


图 7 数字物理混合系统处理器计算资源分配

Fig. 7 Processor assignment map of hybrid PV system

在混合仿真系统中很重要的一部分就是实现 RTDS 平台内的数字系统和两块 DSP 构成的物理系统之间的通信，需要用到 RTDS 实时仿真器配套的数字量输入卡（GTDI）和模拟量输出卡（GTAO）来处理信号。

GTDI 卡是 RTDS 配套的数字量输入卡，需要 24 V 供电，能提供 64 路隔离的数字量输入通道，能够识别开关频率最高为 15 kHz 的 PWM 信号。混合系统中从两块 DSP 板总共有 7 路 PWM 信号需要通过 GTDI 卡回送给 RTDS，包括 1 路 Boost 电路 IGBT 驱动信号和 6 路逆变并网电路 IGBT 驱动信号。

GTAO 卡是 RTDS 配套的模拟量输出卡，需要 24 V 供电，提供 16 位精度的 D/A 转换，能够输出 12 路  $\pm 10$  V 的模拟量，输出通道采用周期为 1  $\mu$ s 的过采样方式保证输出通道的同步性。GTAO 卡输出的模拟量传送给 DSP 卡的 AD 采样端口，AD 模块将模拟量转化为数字量，送入 DSP 进行后续计算。由于 GTAO 卡的模拟量输出范围是 0~10 V，而 DSP 控制板的 AD 采样范围是 0~3 V，所以需要调整 GTAO 卡的输出范围进行调整，在不超出范围的情况下尽可能多的利用 AD 采样的区间，如图 8 所示为 GTAO 卡在 RSCAD 中的设置模块。GTAO 卡处理的信号包括系统模型的电网侧和太阳能电板侧，其中电网侧需要输出三相电压、电流和直流母线电压，共占用 GTAO 卡 7 个通道；太阳能电板侧需要输出直流电压、直流电流，共占用 GTAO 卡 2 个通道。数字物理系统合计需 9 个 GTAO 通道及 7 个 GTDI 通道。

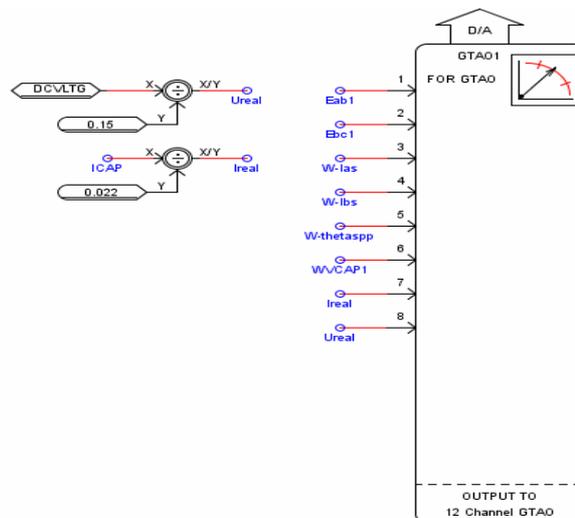


图 8 GTAO 卡接口设置

Fig. 8 Setup of GTAO card

### 4 仿真结果分析与验证

最终搭建好的数字物理硬件在环仿真光伏并网模型容量为 520 kWp，其具体系统参数及并网效果

如表1所示。

表 1 数字物理系统测试结果 (2.5 kHz)

Table 1 Simulation result of hybrid PV system

光伏电池板	
电池板容量	520 kWp
最大功率点工作电压	750 V
DC/DC 升压部分	
开关频率	2.5 kHz
电感参数	10 mH
MPPT 追踪时间	0.30 s
MPPT 追踪效果	稳定工作在最大功率点时波动 5 V 左右, 0.67%
DC/AC 逆变并网部分	
直流母线电容	22 000 $\mu$ F
直流母线电压	1 200 V
开关频率	3 kHz
并网控制策略	两电平双闭环 PQ 解耦并网, SVPWM 调制
并网效果	并网电流波形接近正弦波, 谐波 THD 值 2.0%
总体效率	并网输送功率 500 kW, 光伏电池板容量 520 kWp 光伏并网系统总体效率 96.15%

由图9可以看出光伏系统MPPT部分的追踪效果, 仿真开始时系统工作在由预设占空比决定的电压下, 如图所示为240 V, MPPT在时间轴横坐标为3.38 s左右启动, 经过0.30 s左右光伏板工作电压趋于稳定, 于横坐标3.68 s处光伏板工作电压稳定在最大功率点, 电压为750 V左右, 波动5 V, 电压波动0.67%。

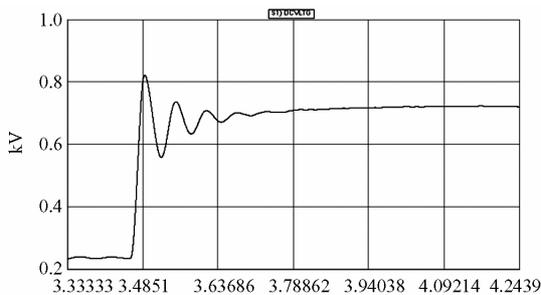


图 9 MPPT 启动时光伏电池板工作电压

Fig. 9 Voltage of PV array when MPPT starts

由图10、图11可以看出系统的并网效果。光伏系统最终并入690 V的三相交流大电网, 电压波形如图10所示。并网电流波形如图11所示, 接近正弦波, 经过分析计算得到谐波THD值为2.07%。

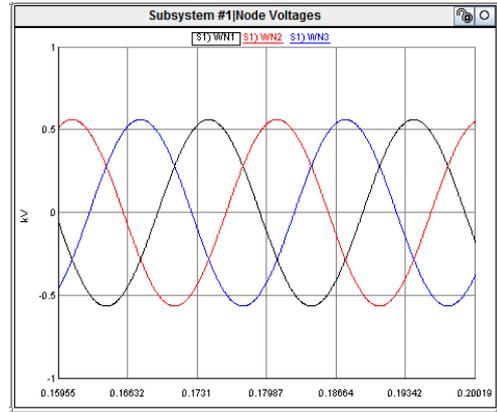


图 10 并网电压波形

Fig. 10 Grid-connected voltage of hybrid PV system

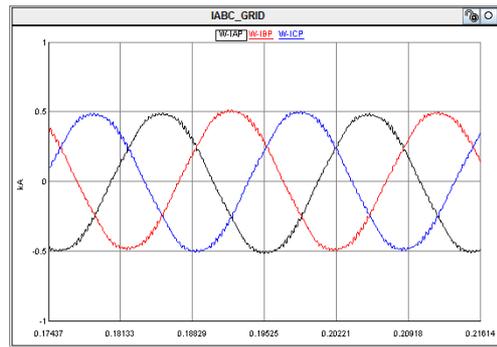


图 11 并网电流波形

Fig. 11 Grid-connected current of hybrid PV system

如图12所示为并网的有功无功曲线, 图中上面的曲线是有功功率曲线, 纵坐标单位是MW, 下面的曲线是无功功率曲线, 纵坐标单位是Mvar。平均有功功率稳定在0.50 MW, 平均无功功率稳定在0.09 Mvar, 整个系统的并网效率为500 kW/520 kWp=96.15%。

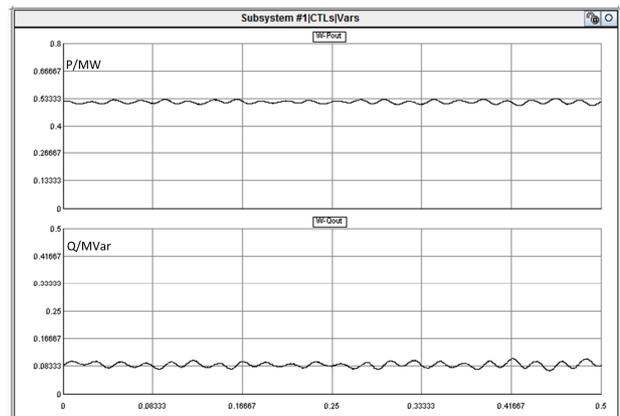


图 12 并网时光伏系统输出的有功无功功率

Fig. 12 Active power and reactive power of hybrid system

## 5 结论

基于本文设计的数字物理混合仿真平台, 能够对光伏并网系统进行硬件在环的仿真模拟, 实现最大功率跟踪和并网控制的功能。该混合仿真平台整合了数字仿真和物理仿真的优点, 能够提供准确的仿真结果, 为研究光伏并网系统的多电站聚合、局部阴影下的表现和低电压穿越等问题提供了崭新而有效的实验手段和分析方法。

## 参考文献

- [1] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 104-108.  
GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, ZHAO Yao, et al. Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 104-108.
- [2] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 248-254.  
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 248-254.
- [3] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模与仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(34): 83-87.  
LI Jing, XU Hong-hua, ZHAO Hai-xiang, et al. Dynamic modeling and simulation of the grid-connected PV power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(34): 83-87.
- [4] 柳勇军, 闵勇, 梁旭, 等. 电力系统数字混合仿真技术综述[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 38-43.  
LIU Yong-jun, MIN Yong, LIANG Xu, et al. Overview on power system digital hybrid simulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 38-43.
- [5] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.  
ZHOU Jun, GUO Jian-bo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for  $\pm 500$  kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [6] 周俊, 郭剑波, 朱艺颖, 等. 特高压交直流电网数模混合实时仿真系统[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 18-22.  
ZHOU Jun, GUO Jian-bo, ZHU Yi-ying, et al. Digital-analog hybrid real-time simulation system of UHVDC and UHVAC power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 18-22.
- [7] Lauss G, Lehfuss F, Viehweider A, et al. Power hardware in the loop simulation with feedback current filtering for electric systems[C] // IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. 7-10 Nov, 2011: 3725-3730.
- [8] 刘其辉, 李万杰. 双馈风机发电及变流控制的数/模混合仿真方案分析与设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 83-86.  
LIU Qi-hui, LI Wan-jie. Analysis and design of digital/physical hybrid simulation scheme for doubly-fed induction generator wind turbine and its converter control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 83-86.
- [9] 郑鹤玲. 基于 RT-LAB 的光伏发电实时仿真系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 2-6.  
ZHENG He-ling. RT-LAB based real-time simulation of photovoltaic power generation system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 2-6.
- [10] Octavian Craciun, Adrian Florescu, Seddik Bacha, et al. Hardware in the loop testing of PV control systems using RT-LAB simulator[C] // International Power Electronics and motion control Conference, IEEE. 2010: 1121-1126.
- [11] Jung Jee-Hoon, Ryu Myong-Hyo, Kim Jong-Hyun, et al. Power hardware in the loop simulation of single crystal line photovoltaic panel using real time simulation techniques[C] // International Power Electronics and Motion Control Conference, IEEE. 2012: 1418-1422.
- [12] 郑飞, 张军军, 丁明昌. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 1-6.  
ZHENG Fei, ZHANG Jun-jun, DING Ming-chang. Low voltage ride through modeling and control strategy for

- photovoltaic generation system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 1-6.
- [13] 刘波, 杨旭, 孔繁麟. 三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 64-70.
- LIU Bo, YANG Xu, KONG Fan-lin. Control strategy study for three phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 64-70.
- [14] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 73-77.
- WU Li-bo, ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng. Research on the stability of MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 73-77.
- [15] 高金辉, 唐静. 一种新型光伏系统最大功率跟踪算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 21-24.
- GAO Jin-hui, TANG Jing. A novel MPPT method for PV systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 21-24.
- [16] Caldron R, Rossetto E, Turrir. Analysis of dynamic performance of dispersed generation connected through inverter to distribution networks[C] // 17th International Conference on Electricity Distribution, 2003: 12-15.
- [17] 苏丽萍, 陈侃, 李国杰, 等. 基于 RTDS 的光伏并网系统实时仿真平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 110-115.
- SU Li-ping, CHEN Kan, LI Guo-jie, et al. Real-time simulation study of photovoltaic grid-connected system by RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 110-115.

---

收稿日期: 2013-05-01; 修回日期: 2013-10-09

作者简介:

陈侃(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统、光伏逆变控制的研究; E-mail: diablo sky76@163.com

冯琳(1976-), 女, 通信作者, 讲师, 从事新能源控制、电机设计的研究;

贾林壮(1976-), 男, 博士研究生, 从事电力电子、电能质量及光伏逆变控制的研究。