

基于 DIgSILENT 的并网光伏发电系统的建模与仿真

王以笑¹, 张新昌², 路进升¹, 唐云龙¹, 崔丽艳²

(1. 微电网系统公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 基于 DIgSILENT 仿真平台搭建了适用于动态仿真的并网光伏发电系统的工程用数学模型, 包含了光伏阵列、逆变器及其控制系统模型。该系统采用电压外环电流内环的双闭环控制方法, 直流电压外环用于实现光伏电池最大功率点跟踪, 交流电压外环用于控制输出的无功功率。最后, 结合算例, 研究了实际光照强度变化、电网有功调度及电网电压跌落时光伏系统的输出特性。仿真结果表明, 采用的仿真分析方法切实有效, 模型输出与实际输出基本相似。该模型能够很好地实现最大功率跟踪、快速地响应电网调度指令, 电网电压跌落时还可提供一定的无功功率, 可用于实际光伏发电系统的并网分析, 为实际工程研究奠定了基础。

关键词: 光伏发电系统; DIgSILENT; 最大功率点跟踪; 有功调度; 电压跌落

Modeling and simulation of grid-connected PV system based on DIgSILENT software

WANG Yi-xiao¹, ZHANG Xin-chang², LU Jin-sheng¹, TANG Yun-long¹, CUI Li-yan²

(1. Micro-grid System Company, Xuchang 461000, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: An engineering analytical model applied in dynamic simulation of the grid-connected photovoltaic system is established based on the DIgSILENT software, including PV array, inverter and the control system. The system adopts the double-loop feedback control with the inner-loop of current, the outer DC-voltage loop tracks the maximum power point of PV cells while the AC-voltage loop controls the reactive output. At last, the output characteristics of PV power generation system are analyzed under the variation of actual solar radiation, the dispatch of the active power and grid voltage dips. The results of the simulation show that the proposed method is practical and valid, the model output is similar to the actual one basically. This system can track the maximum power point automatically with high accuracy and response to the grid dispatching center rapidly, and provide reactive power during the voltage dip. It can be applied in paralleling operation analysis of photovoltaic system and makes a good groundwork for the practical engineering research.

Key words: photovoltaic generation system; DIgSILENT; maximum power point tracking; active power dispatch; voltage dip

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0049-07

0 引言

大力促进包括光伏发电在内的新能源的开发和利用是解决当前面临的能源短缺危机和缓解环保压力的有效措施^[1]。近年来国家政府也推出了多项支持光伏产业发展的政策措施, 使得太阳能发电技术逐步趋于成熟和完善。太阳能发电技术的不断进步使得光伏电站逐渐具备大规模发电的能力, 而光伏并网发电将成为太阳能利用的一个重要途径^[2-3]。因此, 对并网光伏发电系统的研究具有极大的实际意义, 而建立能够准确反映并网光伏发电系统动态响应的仿真模型是开展相关研究的基础。

本文从光伏电池的工程实用模型及光伏并网逆

变器的控制方法入手, 在 DIgSILENT 仿真平台上搭建了并网光伏发电系统的工程实用模型及其控制模型, 在此基础上对该系统模型在环境条件变化、电网调度及电压跌落等情况下进行了仿真分析。

1 并网光伏发电系统建模

1.1 并网光伏发电系统的结构

本文采用使用较多的单级隔离型并网光伏发电系统^[4], 其结构如图 1 所示, 主要由光伏阵列、直流母线电容、逆变器及滤波器组成, 通过隔离变压器与电网连接。在该结构中交流输出侧连接有工频变压器, 这样有效减小了并网所需要的直流侧电压值, 即使光伏电池在电压不高的情况下也能够继续

逆变并网。

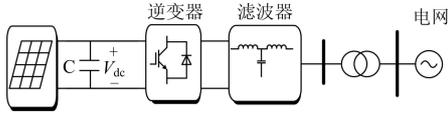


图 1 单级隔离型并网光伏发电系统

Fig. 1 Single-stage isolated grid-connected PV system

1.2 光伏电池模型

光伏电池是一种由于“光生伏打效应”而将太阳能直接转化为电能的器件，是一个半导体光电二极管。光伏电池本身是一个 P-N 结，其基本特性与二极管类似，其等效电路由光生电流源和一系列电阻组成，如图 2 所示。

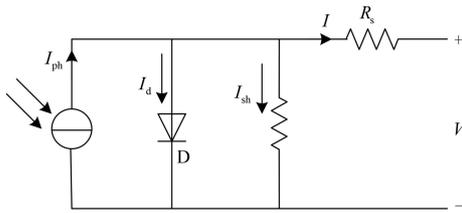


图 2 光伏电池的等效模型

Fig. 2 Equivalent circuit of PV cell

根据图 2 可以得到光伏电池输出的伏安特性为

$$I = I_{ph} - I_{D0} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中： I 、 V 分别为光伏电池的输出电流、电压； I_{ph} 为光生电流源电流； q 为电子的电荷； K 为波耳兹曼常数， $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； A 为二极管特性因子（1 或 2）； I_{D0} 为光伏电池在无光照时的饱和电流； R_s 、 R_{sh} 分别为串联电阻和旁漏电阻。

式（1）中含有 I_{ph} 、 I_{D0} 、 R_s 、 A 等未知参数，而且都与温度和光照强度有关，不便于工程应用。工程用模型强调的是实用性与精确性的结合，考虑到在数字仿真时的动态反应速度及计算工作量，必须尽可能在工程精度允许的条件下简化式（1）所示的模型。

光伏电池厂家提供的技术参数主要是光伏电池产品在标定测量条件（STC）下（光谱： $AM=1.5$ ，光照强度 $E_{ref}=1000 \text{W/m}^2$ ，温度 $T_{ref}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ）的参数：开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 V_m 、最大功率点电流 I_m 和最大功率点功率 P_m 。因此，要建立工程数学模型，就要在式（1）基础上做两点近似^[5]，得出光伏电池的工程实用模型如式（2）。

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left(e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right\} \quad (2)$$

其中的 C_1 、 C_2 为待定系数，分别为

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (3)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) / \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \quad (4)$$

由式（3）、式（4）可知，在电池参数 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 已知时， C_1 、 C_2 为常数，代入式（2）便得到光伏电池的 I-V 特性。当光照强度或温度变化时，可假设 $\Delta T = T - T_{ref}$ ， $\Delta E = E/E_{ref} - 1$ ，则可根据标定测量条件（STC）下的 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 推算出新光照强度和新电池温度下的 I'_{sc} 、 V'_{oc} 、 I'_m 、 V'_m 分别为

$$I'_{sc} = I_{sc} \frac{E}{E_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (5)$$

$$V'_{oc} = V_{oc} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta E) \quad (6)$$

$$I'_m = I_m \frac{E}{E_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (7)$$

$$V'_m = V_m (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta E) \quad (8)$$

将 I'_{sc} 、 V'_{oc} 、 I'_m 、 V'_m 再代入式(2)~式(4)便得出新日照强度和新电池温度下光伏电池 I-V 特性。其中的系数 a 、 b 、 c 的典型取值为 $a=0.0025/^\circ\text{C}$ 、 $b=0.5/^\circ\text{C}$ 、 $c=0.00288/^\circ\text{C}$ 。由此可见，式（2）所示的工程实用模型能模拟任意型号的光伏电池，具有较好的通用性^[6-7]。

在 DIgSILENT 仿真软件中，光伏电池组件可采用静态发电机元件来模拟，其元件图如图 3 所示。

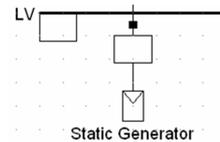


图 3 静态发电机元件图

Fig. 3 Component of the static generator

该静态发电机可以用来表示多种类型的非旋转发电装置，对于不同的发电装置需要建立相应的具体模型。在 DIgSILENT 仿真软件中根据上述光伏电池的工程实用模型搭建的光伏电池模型如图 4 所示。

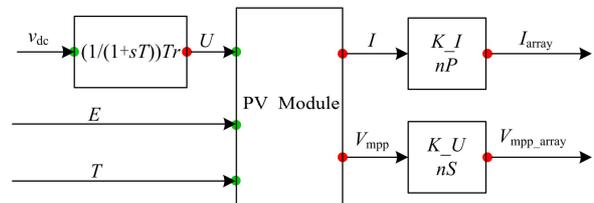


图 4 光伏电池模型

Fig. 4 Photovoltaic array model

其中, PV Module 模块即是根据光伏电池的工程实用模型搭建的, 其输入 E 和 T 分别为当前的光照强度、温度, 输出 I_{array} 、 V_{mpp_array} 即分别为光伏阵列的输出电流和最大功率点电压。

1.3 光伏逆变器模型

并网光伏逆变器输出的控制目标为: 通过控制使得输出电流为正弦波, 并保证该波形是稳定的、高品质的, 且与电网电压同频同相, 最终能实现稳定并网^[8-9]。通常情况下, 并网光伏逆变器采用功率外环和电流内环双闭环控制方式, 由功率外环实现光伏阵列的 MPPT 跟踪控制, 并得到内环电流参考值 I_{d_ref} 、 I_{q_ref} , 由电流内环得到逆变器的调制比, 作为逆变器的输入, 并通过 PLL 锁相环节得到与电网电压同频同相的脉宽调制信号^[10-13], 控制逆变器开关管的通断, 以输出正弦波电流。

而在 dq 坐标系下逆变器输出的有功功率和无功功率分别为: $P = v_d i_d + v_q i_q$, $Q = v_q i_d - v_d i_q$, 令 $v_q = 0$ 时有 $P = v_d i_d$, $Q = -v_d i_q$, 由此可知, 通过控制电流的 d 、 q 轴分量 i_d 、 i_q 来分别控制 P 和 Q 。而光伏发电系统输出的功率受外部工作条件的影响比较大, 在工作温度、光照强度发生变化时, MPPT 控制器将动作调整系统的工作电压在当前工况下的最大功率点, 相应的输出电压为 V_m , 因此可以通过调整直流母线电压来调整其输出的 P , 从而光伏系统的最大功率跟踪控制就简化成了稳压控制, 而且采用这样的方法可以使得一些光伏系统多获得至少 20% 的电能^[14], 相应的可由直流母线电压外环得到内环 d 轴电流的参考值 I_{d_ref} 。

根据国家标准《光伏电站接入电网技术规定》,

大中型光伏电站在电网发生故障时要有低电压穿越的能力, 能为保持电网稳定性提供支撑, 如图 5 所示。

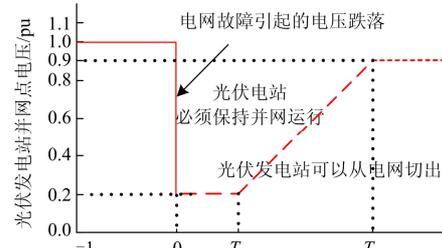


图 5 光伏电站低电压穿越的要求

Fig. 5 Requirements of LVRT ability of PV station

因此, 光伏电站在电压跌落期间需要发出一定的无功功率, 支撑电网电压。可以通过交流母线电压的测量值 U_{ac} 与参考值 U_{ac0} 的偏差大小来判断是否需要发出无功电流以及发出无功电流的大小, 即由交流电压外环来得出内环 q 轴的电流参考值 I_{q_ref} ^[15]。

综合上述分析, 本文逆变器采用电压外环电流内环的双闭环控制, 有功的调节主要根据 MPPT 控制器得到的直流电压参考值来进行调节, 正是这个直流电压体现了光伏阵列的 MPPT 效果; 而无功功率主要是通过检测电网电压偏差是否越限来决定是否提供无功电流。在 DigSILENT 中的逆变器外环控制模型如图 6 所示。由于在频率越限时需要对有功功率进行修正, 因此在有功控制环节加入了有功功率修正量 $pred$, 正常运行时 $pred$ 为 1, 当电网频率高于最大允许运行频率时需要对有功功率进行衰减。

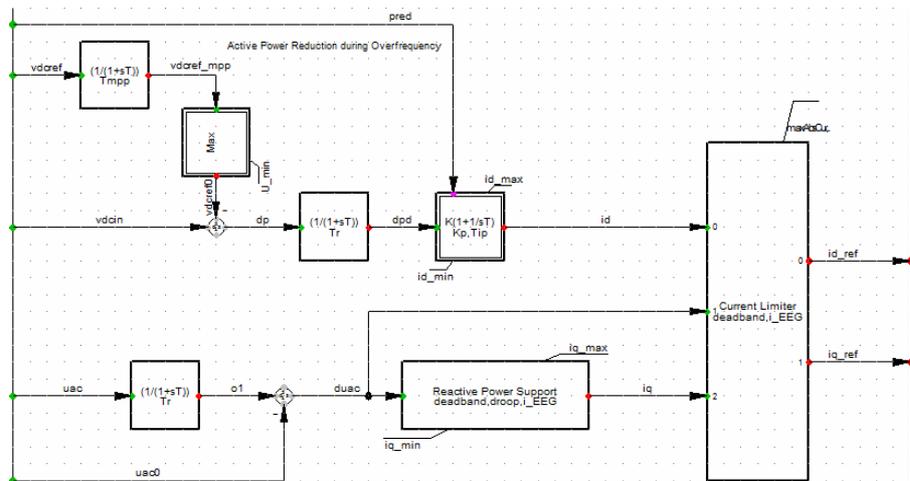


图 6 逆变器外环控制模型

Fig. 6 Control model of the inverter

图 7 为电流的内环控制模型图，在 DIgSILENT 中逆变器模块内部带有此模型，因此用户只需修改其参数即可。

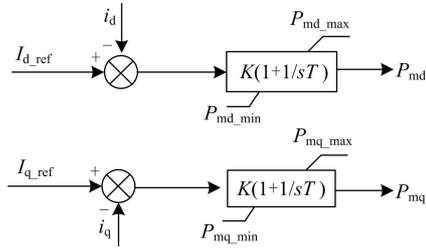


图 7 电流内环控制框图

Fig. 7 Control structure of current inner loop

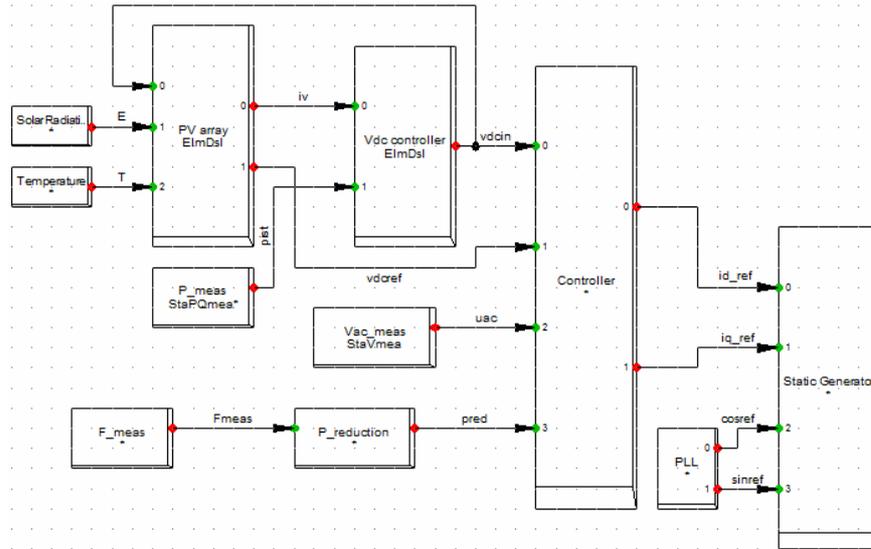


图 8 光伏发电系统的控制框架

Fig. 8 Control frame of the PV generator

2 算例仿真

2.1 算例说明

本文基于 DIgSILENT 软件搭建并网光伏发电系统的模型，采用单机无穷大系统，以浦江嘉恒光伏科技有限公司生产的 100 W 单晶硅光伏电池板为例，光伏电站总体容量设计为 0.5 MW，组件参数如表 1 所示，并设光伏电站初始工作光照强度为 1 000 W/m²，温度为 25 °C。

表 1 电池组件参数

Table 1 Parameters of the PV array

开路电压 (V_{oc})	42.84 V
短路电流 (I_{sc})	3.14 A
最佳工作电压 (V_m)	35.64 V
最佳工作电流 (I_m)	2.81 A
串联数 nS	20
并联数 nP	220

1.4 光伏发电系统模型

综合上述的光伏电池模型和逆变器模型，在仿真软件中搭建的光伏系统模型的控制框架如图 8 所示，主要模块包括光照 (Solar Radiation)、温度 (Temperature)、光伏电池 (PV array)、直流电压控制 (Vdc controller) 及逆变器外环控制模块 (Controller)。

其中的逆变器外环控制模块输出的内环电流参考值 i_{d_ref} 、 i_{q_ref} 以及由 PLL 锁相环节得到与电网电压同频同相的正弦信号输入到静态发电机 (Static Generator) 中，使其输出与电网电压同频同相的正弦波电流。

2.2 工作环境变化

在 2 s 时光照强度在 0.1 s 内斜坡变化为 1 100 W/m²，仿真结果如图 9 所示。

由图 9 (a) ~ (c) 可以看出，当温度不变，光照强度增加时，光伏阵列工作电压及并网电流均随光照强度的增加呈上升趋势，MPPT 控制器动作调整直流母线电压从 714 V 增加到 839 V，光伏电站输出的有功功率相应地由 0.44 MW 增加到 0.475 MW，而由于交流母线电压未越限因此无功功率仍为 0，说明该光伏模型能够很好地实现最大功率跟踪。

由图 9 (d) 可以看出并网电流的相位基本能够跟踪电网电压的相位，系统可以实现并网电流与电网电压的同频同相跟踪，同时由图 9 (c) 可以看出，在光伏系统输出有功功率改变的情况下，系统输出的无功功率仍为 0，也说明了系统并网的相位跟踪是稳定的。

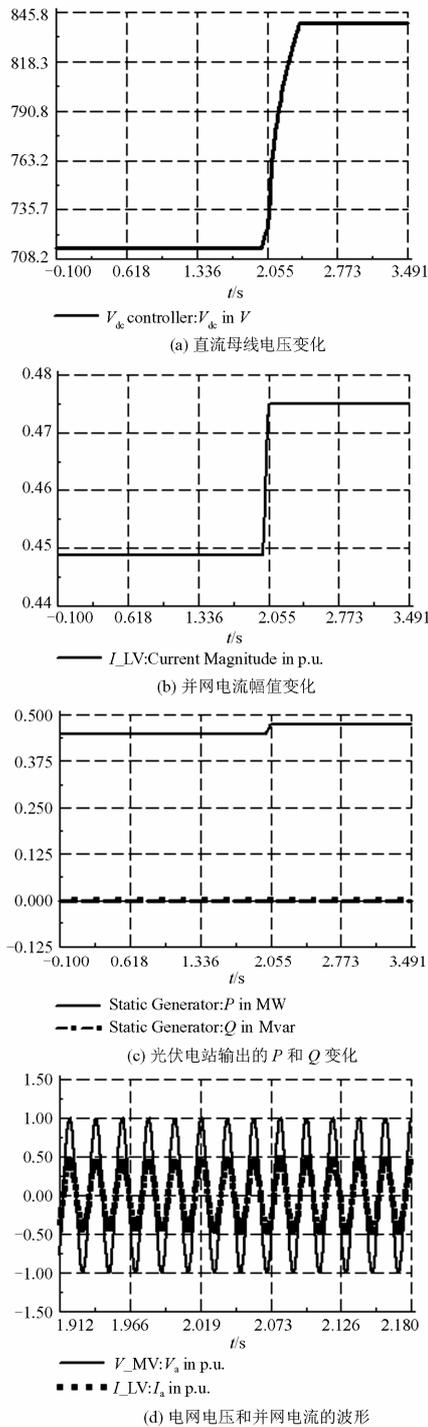


图 9 光照强度变化时的结果

Fig. 9 Results during the variation of solar radiation

2.3 电网有功调度

光伏发电系统不但需要具备能够发出最大功率的能力, 而且还需要在电网对其有需求时满足电网的调度。国家标准《光伏电站接入电力系统技术规定》中指出, 光伏电站应能够接受并自动执行

电力系统调度机构下达的有功功率及有功功率变化的控制指令, 因此还需要对有电网调度时的光伏发电系统进行仿真分析。图 10 为 2 s 时电网对光伏电站下发输出有功功率指令为 0.2 MW 时的仿真结果。

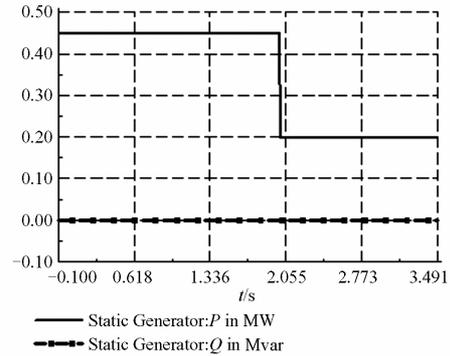


图 10 电网下发有功调度指令的结果

Fig. 10 Results during the dispatch of the active power

由图 10 可以看出, 在有电网调度的情况下, 光伏电站能够很快地接受调度指令并迅速调节控制器使其输出达到调度值。

2.4 电压跌落

设置在 2 s 时交流母线 MV 发生三相故障, 通过设置接地阻抗使其电压跌落程度为 50%, 其仿真结果如图 11 所示。

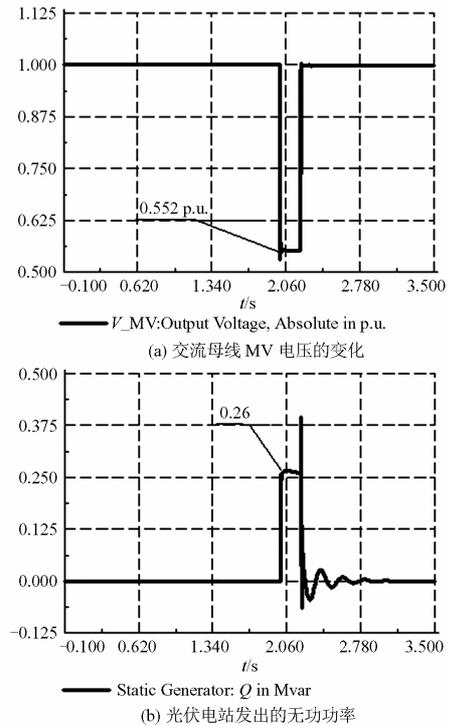


图 11 交流母线电压跌落 50%时的仿真结果

Fig. 11 Behaviour of the PV model in 50% voltage dip

由图 11 可以看出,由于本文的逆变器控制器中加入了无功控制,在电压跌落时可以发出一定的无功功率,因此在未加入无功控制电压跌落到 0.5 p.u. 的情况下,加入无功控制之后电压只跌落到 0.552 p.u.,光伏电站发出 0.26 Mvar 的无功功率。仿真结果说明了本文所采用的控制策略中加入了电压无功控制,使得并网点电压得到了一定程度的恢复。

3 结论

本文通过对光伏电池的工程实用模型及并网逆变器的电压电流双环控制模型的研究,基于 DIgSILENT 仿真平台利用仿真算例进行仿真,验证了该并网光伏发电系统模型在工作环境变化时能够很好地实现最大功率跟踪,且并网电流基本上能够跟踪电网电压的相位;在电网下发有功调度指令能够快速响应控制指令;在电网电压跌落时能够发出一定的无功功率,以支撑局部电网电压,从而可以减少静止无功补偿器等装置,减少建设成本,具有一定的理论和现实意义。

参考文献

- [1] 雷一, 赵争鸣. 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述[J]. 电力电子, 2010, 8(3): 16-22.
LEI Yi, ZHAO Zheng-ming. Overview of large-scale PV integration key technologies and its impact[J]. Power Electronics, 2010, 8(3): 16-22.
- [2] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析-光伏电站专题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG De-zhou, WANG Li-ping, ZHANG Jun, et al. Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.
- [3] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
CHEN Quan, LI Ling-dong, WANG Qun-jing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [4] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74, 91.
WANG Fei, YU Shi-jie, SU Jian-hui, et al. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of china Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 72-74, 91.
- [5] Platon Baltas. The Arizona University photovoltaic designer program[D]. Tempe, Arizona: Arizona State University, 1996.
- [6] 傅望, 周林, 郭珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211-216.
FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-216.
- [7] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
SU Jian-hui, YU Shi-jie, ZHAO Wei, et al. Silicon solar cell engineering model[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412.
- [8] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83-86.
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(24): 83-86.
- [9] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
ZHOU Nian-cheng, YAN Li-wei, WANG Qiang-gang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [10] 陈卫民, 陈国呈, 崔开涌. 分布式并网发电系统在孤岛时的运行控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 88-91.
CHEN Wei-min, CHEN Guo-cheng, CUI Kai-yong. Running control of grid-connected dispersed generation systems in islanding situation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 88-91.
- [11] Pecas J A, Moreira C L, Madureira A G. Defining control strategies for micro-grids islanded operation[J]. IEEE

- Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [12] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
- SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [13] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 229-234.
- YANG Yong-heng, ZHOU Ke-liang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 229-234.
- [14] 汪海宁. 光伏并网功率调节系统及其控制的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- WANG Hai-ning. Research on the photovoltaic grid-connected power conditioner system and its control strategies[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005.
- [15] 陈波, 朱晓东, 朱灵芝, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.
- CHEN Bo, ZHU Xiao-dong, ZHU Ling-zhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-07-14

作者简介:

王以笑 (1982-), 男, 硕士, 研究方向为分布式发电和微电网技术; E-mail: wangyixiao@tju.edu.cn

张新昌 (1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化设备的开发与管理;

路进升 (1973-), 男, 本科, 工程师, 从事光伏发电系统方面的研究及工程应用。