

6-1-2020

Multi-rate Simulation Based on Explicit-implicit Hybrid Integration

Bingda Zhang

Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

Chen Ming

Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

Wang Xiao

Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

Lanyu Wang

Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-rate Simulation Based on Explicit-implicit Hybrid Integration

Abstract

Abstract: A multi-rate simulation method based on explicit-implicit hybrid integration algorithm for the grid-connected photovoltaic system which included power electronic devices with a variety of switching frequency was put forward. *Inductances and capacitances were used to divide the grid-connected photovoltaic system into subsystems. A multi-rate interface was put forward to satisfy the request of real time. The stability criterion of the multi-rate simulation algorithm was put forward.* FPGA was used as a platform to build the digital grid-connected photovoltaic system. The hardware in loop test for DC/DC and DC/AC converter controllers was conducted on this platform to verify the accuracy of the proposed multi-rate simulation method.

Keywords

grid-connected photovoltaic system, real-time simulation, multi-rate simulation, explicit-implicit hybrid integration

Recommended Citation

Zhang Bingda, Chen Ming, Wang Xiao, Wang Lanyu. Multi-rate Simulation Based on Explicit-implicit Hybrid Integration[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1641-1646.

基于显隐式混合积分的多速率仿真

张炳达, 陈铭, 王潇, 王岚禹
(天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对光伏发电并网系统中存在多种开关频率的电力电子器件, 研究了一种基于显隐式混合积分的多速率仿真方法。利用电感和电容将光伏发电并网系统拆分为多个子系统, 提出了一种多速率接口算法以使各子系统均满足实时性, 给出了多速率仿真方法的稳定条件。在 FPGA 平台上搭建了数字式光伏发电并网系统, 并进行了 DC/DC 和 DC/AC 变流控制器硬件在环试验, 验证了上述多速率仿真方法的准确性。

关键词: 光伏发电并网系统; 实时仿真; 多速率仿真; 显隐式混合积分

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 08-1641-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201708002

Multi-rate Simulation Based on Explicit-implicit Hybrid Integration

Zhang Bingda, Chen Ming, Wang Xiao, Wang Lanyu

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A multi-rate simulation method based on explicit-implicit hybrid integration algorithm for the grid-connected photovoltaic system which included power electronic devices with a variety of switching frequency was put forward. Inductances and capacitances were used to divide the grid-connected photovoltaic system into subsystems. A multi-rate interface was put forward to satisfy the request of real time. The stability criterion of the multi-rate simulation algorithm was put forward. FPGA was used as a platform to build the digital grid-connected photovoltaic system. The hardware in loop test for DC/DC and DC/AC converter controllers was conducted on this platform to verify the accuracy of the proposed multi-rate simulation method.

Keywords: grid-connected photovoltaic system; real-time simulation; multi-rate simulation; explicit-implicit hybrid integration

引言

光伏发电作为一种有效利用太阳能的技术正快速发展, 并已经成为国内可再生能源发展战略的重要内容, 与其相关的技术研究也在不断深

入^[1-4]。为保证光伏发电系统的稳定运行, 减少相关设备的开发成本与周期, 对其进行的仿真研究非常重要。

文献[5-6]利用 PSCAD/EMTDC 对光伏电池模型进行优化, 并对光伏发电并网系统进行了很详细的数字仿真; 文献[7]利用 MATLAB/Simulink 对光伏并网控制策略进行了研究; 文献[8]利用 MATLAB/Simulink 对光伏并网发电系统在孤岛现象下的 DC/AC 全桥开关逆变器的非线性模型进行了仿真。这些离线仿真工具因仿真速度与实际



收稿日期: 2015-09-15 修回日期: 2015-12-15;
基金项目: 国家自然科学基金(51477114), 天津市科技计划(13TXSYJC40400);
作者简介: 张炳达(通讯作者 1959-), 男, 江苏常熟, 硕士, 教授, 博导, 研究方向为电能质量监测与控制、电力系统仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1641 •

系统不同,不能直接用于对真实变流控制器的测试。

文献[9]利用真实设备实现了一个用于光伏并网控制策略分析的光伏微网测试系统,但在接入变流控制器进行试验时,控制方法错误、硬件故障以及误操作可能导致设备的损坏。因此,建立针对光伏发电系统的数字式实时仿真平台是十分必要的。

常见的电力系统实时仿真平台有 Opal-RT 公司的 RT-LAB、RTDS 公司的实时数字仿真器(real-time digital simulator, RTDS)等,这些数字仿真器可以进行实时仿真、快速控制,并且支持真实设备的硬件在回路测试。但是,RT-LAB 的仿真步长最短为 $10 \mu\text{s}$ ^[10],RTDS 的仿真步长最短为 $1.4 \mu\text{s}$ ^[11]。光伏发电并网系统中存在大量的电力电子器件,其开关频率可达 200 kHz,采用 RT-LAB、RTDS 仿真器对电力电子器件仿真很难达到较高的仿真精度。与商业 RT-LAB、RTDS 不同,具有高速并行计算能力的现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)可以自由编程,仿真步长可达亚微秒级^[12-13]。因此,FPGA 非常适合含有电力电子器件的电力系统电磁暂态实时仿真。

本文提出了一种基于 FPGA 的光伏发电并网系统的数字式实时仿真平台,为真实的变流控制器提供测试环境。为了满足对电力电子器件的仿真精度,应选择较小的仿真步长。但是,在对一定规模的光伏发电并网系统进行详细仿真时,选择较小的仿真步长难以满足实时性的要求。由于光伏发电并网系统中 DC/DC 变换的电力电子器件比 DC/AC 变换的电力电子器件开关频率高得多,本文对不同开关频率的电力电子器件采用不同的仿真步长,将光伏发电并网系统分割为多个子系统,研究了一种基于显隐式混合积分的多速率仿真方法,对所提方法进行了稳定性分析,建立了 FPGA 光伏发电并网系统的数字式实时仿真平台,并进行了 DC/DC 和 DC/AC 变流控制器硬件在环试验。

1 多速率仿真

1.1 电路拆分

图 1(a)中电容 C 两端的电压 u_C 和流过的电流 i_C 之间的关系为

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (1)$$

当仿真步长为 Δt 并采用显式欧拉法对公式(1)进行差分时有

$$u_C(t) = u_C(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{C} i_C(t - \Delta t) \quad (2)$$

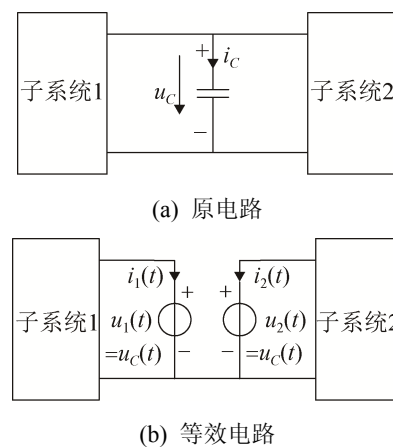


图 1 电容拆分
Fig. 1 Capacitance splitting

由式(2)可知,电容 C 在 t 时刻的电压值由 $t - \Delta t$ 时刻的电容电压、电流值所决定,与 t 时刻的电容电流值无关。因此,可以将电容 C 等效为一个电压源,把图 1(a)电路等效成如图 1(b)所示的两个子系统解耦的电路,且电容电流 $i_C(t) = i_1(t) + i_2(t)$ 。

图 2(a)中电感 L 两端的电压 u_L 和流过的电流 i_L 之间的关系为

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

当仿真步长为 Δt 并采用显式欧拉法对公式(3)进行差分时有

$$i_L(t) = i_L(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{L} u_L(t - \Delta t) \quad (4)$$

由式(4)可知,电感 L 在 t 时刻的电流值由 $t - \Delta t$ 时刻的电感 L 电流、电压值决定,与 t 时刻的

电感电压无关。因此, 可以将电感 L 等效为一个电流源, 把图 2(a) 电路等效成如图 2(b) 所示的两个子系统解耦的电路, 且电感电压 $u_L(t) = u_1(t) - u_2(t)$ 。

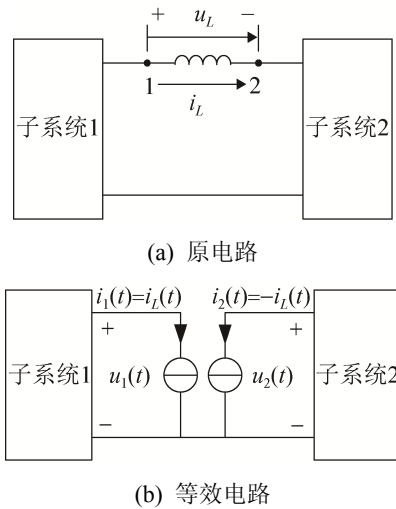


图 2 电感拆分
Fig. 2 Inductance splitting

1.2 仿真过程

假设图 1 和图 2 中子系统 1 的仿真步长为 ΔT , 子系统 2 的仿真步长 Δt , 且 $\Delta T = n\Delta t$ 。

为了提高仿真速度, 计算图 1 子系统 1 的 $i_1(t)$ 和计算图 1 子系统 2 的 $i_2(t - \Delta T + k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, n$) 同时进行。因此, 在计算图 1 子系统 1 的等效电压源时, 认为 $i_2(t - \Delta T + k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, n-1$) 等于 $i_2(t - \Delta T)$ 。图 1 多速率仿真的具体过程如下:

- (1) 计算子系统 1 的等效电压源

$$u_1(t) = u_2(t - \Delta T) + \frac{\Delta T}{C} \times [i_1(t - \Delta T) + i_2(t - \Delta T)] \quad (5)$$

- (2) 由子系统 1 计算出 $i_1(t)$ 。

- (3) 计算子系统 2 第 k 时段的等效电压源

$$u_2(t - \Delta T + k\Delta t) = u_2(t - \Delta T) + \frac{k\Delta T}{nC} \left[i_1(t - \Delta T) + \frac{1}{k} \sum_{j=0}^{k-1} i_2(t - \Delta T + j\Delta t) \right] \quad (6)$$

- (4) 由子系统 2 计算出 $i_2(t - \Delta T + k\Delta t)$ 。

同样, 在对图 2 进行多速率仿真时, 计算图 2 子系统 1 的 $u_1(t)$ 和计算图 2 子系统 2 的

$u_2(t - \Delta T + k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, n$) 同时进行。因此, 在计算图 2 子系统 1 的等效电流源时, 认为 $u_2(t - \Delta T + k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, n-1$) = $u_2(t - \Delta T)$ 。图 2 多速率仿真的具体过程如下:

- (1) 计算子系统 1 的等效电流源

$$i_1(t) = -i_2(t - \Delta T) + \frac{\Delta T}{L} \times [u_1(t - \Delta T) - u_2(t - \Delta T)] \quad (7)$$

- (2) 由子系统 1 计算出 $u_1(t)$ 。

- (3) 计算子系统 2 第 k 时段的等效电流源

$$i_2(t - \Delta T + k\Delta t) = i_2(t - \Delta T) + \frac{k\Delta T}{nC} \left[-u_1(t - \Delta T) + \frac{1}{k} \sum_{j=0}^{k-1} u_2(t - \Delta T + j\Delta t) \right] \quad (8)$$

- (4) 由子系统 2 计算出 $u_2(t - \Delta T + k\Delta t)$ 。

2 稳定性分析

采用隐式梯形法, 将图 1、图 2 中两个子系统简化为诺顿电路。其中, 子系统 1 的等效电流源和等效电阻分别为 $I_1(t - \Delta T)$ 和 R_1 , 且满足

$$i_1(t) = -\frac{u_1(t)}{R_1} + I_1(t - \Delta T) \quad (9)$$

子系统 2 的等效电流源和等效电阻分别为 $I_2(t - \Delta t)$ 和 R_2 , 且满足

$$i_2(t) = -\frac{u_2(t)}{R_2} + I_2(t - \Delta t) \quad (10)$$

对公式(5)、(6)、(9)、(10)进行 z 变换, 整理后可得

$$u_2(z) = \frac{AI_1(z) + BI_2(z)}{z \left\{ (z^n + k_1) [z^n - (1 - k_2)^n] + \frac{k_1}{n} (1 - nk_2) \sum_{j=0}^{n-1} (1 - k_2)^j \right\}} \quad (11)$$

式中: $k_1 = \frac{\Delta T}{CR_1}$, $k_2 = \frac{\Delta T}{nCR_2}$, $A = -k_2 z R_2 \sum_{j=0}^{n-1} (1 - k_2)^j$, $B = \{(z^n + k_1) k_2 \sum_{j=0}^{n-1} (1 - k_2)^j z^{n-j-1} + k_1 k_2 z \sum_{j=0}^{n-1} (1 - k_2)^j\} R_2$ 。

对公式(7)~(10)进行 z 变换, 整理后可得

$$i_2(z) = \frac{CI_1(z) + DI_2(z)}{z \left\{ (z^n + k_3) [z^n - (1 - k_4)^n] + \frac{k_3}{n} (1 - nk_4) \sum_{j=0}^{n-1} (1 - k_4)^j \right\}} \quad (12)$$

式中: $k_3 = \frac{\Delta TR_1}{L}$, $k_4 = \frac{\Delta TR_2}{nL}$, $C = -\frac{k_3}{n} z \sum_{j=0}^{n-1} (1-k_4)^j$,

$$D = (z^n + k_3)k_4 \sum_{j=0}^{n-1} (1-k_4)^j z^{n-j-1} + k_3 k_4 z \sum_{j=0}^{n-1} (1-k_4)^j.$$

可以证明, 当 $1-k_1 > 0$ 、 $1-nk_2 > 0$ 、 $1-k_3 > 0$ 、 $1-nk_4 > 0$ 时, 公式(11)的 $u_2(z)$ 和公式(12)的 $i_2(z)$ 的极点 $|z_i| < 1$, 具有稳定性。

因此, 当 $\Delta T < CR_1$ 、 $\Delta t < CR_2/n$ 时, 图 1 所示的电容拆分电路的多速率仿真方法是可行的, 且子系统等效电阻越大越好, 当子系统比较复杂时, 可将某些元件用短路替代后再计算子系统等效电阻; 当 $\Delta T < L/R_1$ 、 $\Delta t < L/nR_2$ 时, 图 2 所示的电感拆分电路的多速率仿真方法是可行的, 且子系统等效电阻越小越好, 当子系统比较复杂时, 可将某些元件用开路替代后再计算子系统等效电阻。

3 仿真实验

图 3 所示的光伏发电并网系统的参数为: $C_1 = C_2 = 5\,000\ \mu\text{F}$, $C_3 = 275\ \mu\text{F}$, $L_1 = 0.1\ \text{H}$, $L_2 = 0.32\ \text{mH}$, $L_3 = 0.16\ \text{mH}$, $R'_1 = 0.001\ \Omega$, $R'_2 = 1\ \Omega$ 。光伏电源开路电压 $U_{oc} = 0.433\ \text{kV}$, 短路电流 $I_{sc} = 1.675\ \text{kA}$, 最大功率电压 $U_m = 0.348\ \text{kV}$, 最大功率电流 $I_m = 1.475\ \text{kA}$ 。电网电压为 $380\ \text{V}$, 其内阻 $R_0 = 0.018\ \Omega$, $L_0 = 0.1\ \text{mH}$ 。采用最大功率策略控制 DC/DC 变换器开关管的通断^[14-15], 其开关频率为 $100\ \text{kHz}$ 。采用恒直流电压恒无功功率控制算法^[16-18]控制 DC/AC 逆变器开关管的通断, 其开关频率为 $10\ \text{kHz}$ 。

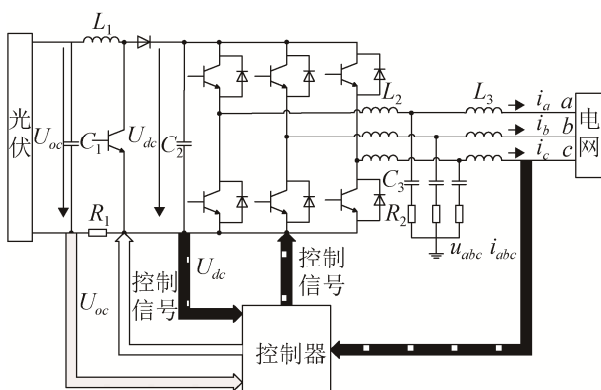


图 3 光伏发电并网系统
Fig. 3 Grid-connected photovoltaic power system

通过电容 C_2 将图 3 拆分为两个子系统, 根据开关管的开关频率, 将子系统 1 的仿真步长设置为 $0.5\ \mu\text{s}$, 子系统 2 的仿真步长设置为 $5\ \mu\text{s}$, 两个子系统均采用隐式梯形法进行差分。由于开关管的状态直接影响电容 C_2 两侧等效电阻的大小, 应从最不利的情况验证稳定条件。由于子系统 1 的等效电阻大于 $100\ \text{k}\Omega$, 子系统 2 的等效电阻大于 $48\ \Omega$ (逆变器开关管状态造成 C_2 两侧短路除外), 满足稳定性条件, 故对图 3 采用仿真步长为 $0.5\ \mu\text{s}/5\ \mu\text{s}$ 多速率仿真是可行的。

为保证不同开关管状态具有相同的电路结构, 采用可变电阻开关模型^[19]。为了减小计算量, 事先计算出不同开关管状态下的节点电压方程的导纳矩阵的逆, 求节点电压时仅需进行可并行的相乘运算。因此, 多速率仿真降低了节点导纳矩阵的维数和开关管 (包括二极管) 状态的组数, 能有效节省数据的存储空间与运算器资源。

为了避免求解非线性方程, 采用分段线性法将光伏电源等效为一个诺顿电路, 电流源和电阻的大小根据电容 C_1 上的电压查表获得。

本文选择图 4 所示 Altera 公司的 DSP Stratix V 官方开发板模拟光伏发电并网系统主电路。该开发板配有 Stratix V 系列 FPGA 5SGSMD5, 该芯片包含 457 000 个逻辑单元、172 600 个自适应逻辑模块、39 Mbit 嵌入式存储资源、3 180 个 18×18 硬件乘法器、24 个锁相环资源等。选择天津大学智能电网教育部重点实验室研制的光伏发电并网控制器进行硬件在环试验。

编程时, 将双精度浮点数除法、乘法、加法运算器和读写 RAM 操作的流水线长度设计为 7、5、10 和 2, 开发板时钟频率为 $200\ \text{MHz}$ 。由于 5SGSMD5 的资源比较丰富, 采用资源换时间的策略。这样, 在多速率仿真程序中, 子系统 1 模拟一个步长的执行时间为 $0.295\ \mu\text{s}$, 子系统 2 模拟一个步长的执行时间为 $0.42\ \mu\text{s}$; 在未拆分电路的单速率仿真程序中, 模拟一个步长的执行时间为 $0.53\ \mu\text{s}$ 。

在用 5SGSMD5 进行的仿真过程中, 将电容 C_2 的电压 U_{dc} 和电网侧的电流 i_a 保存在动态 RAM 中, 图 5 为电容 C_2 的电压 U_{dc} 的波形, 图 6 为电网的电流 i_a 的波形。其中, 红色表示 $1 \mu\text{s}$ 仿真步长的单速率仿真数据, 蓝色表示 $0.5 \mu\text{s} / 5 \mu\text{s}$ 仿真步长的多速率仿真数据。

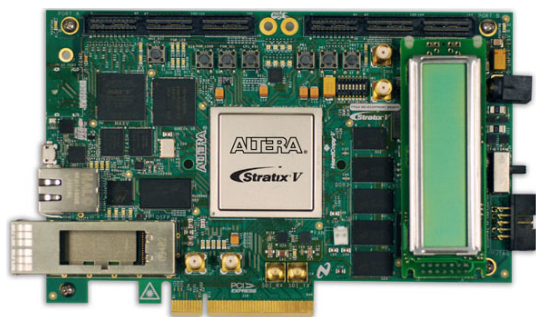


图 4 5SGSMD5 开发板

Fig. 4 5SGSMD5 development kit

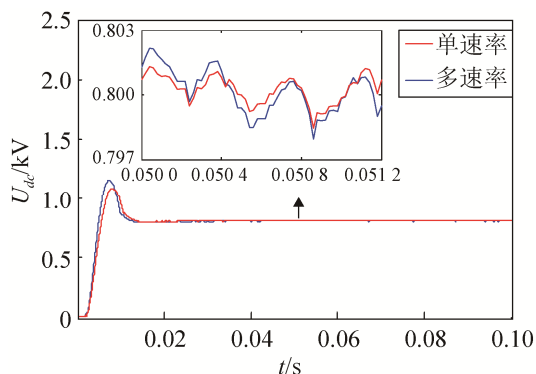


图 5 逆变器直流侧电压

Fig. 5 DC side voltage of converter

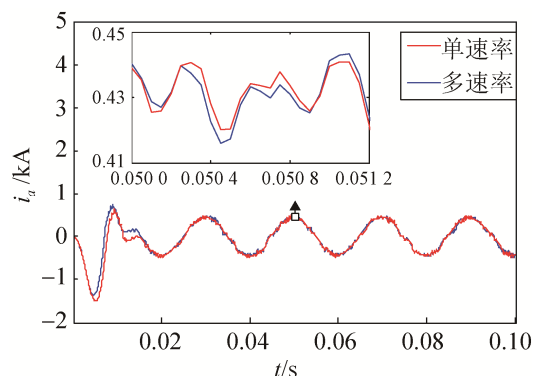


图 6 电网侧 a 相电流

Fig. 6 A phase current of the line side

由波形可知, 采用基于显隐式混合积分的多速

率仿真的效果非常接近较小仿真步长的单速率仿真, 误差在 5% 以内。因此, 当 FPGA 资源有限时, 采用多速率仿真能够在满足实时性的同时最大程度地提高仿真的精度。

4 结论

(1) 采用显隐式混合积分法可将系统划分成多个独立的子系统, 能够提高仿真计算并行度。

(2) 应选择大电容、大电感作为拆分元件, 以保证多速率仿真的计算稳定。

(3) 电容拆分电路时应考虑最小的等效电阻, 电感拆分电路时应考虑最大的等效电阻。

(4) 采用多速率仿真可在廉价的 FPGA 平台上搭建数字式光伏发电系统, 实现 DC/DC 和 DC/AC 变流控制器硬件在环试验。

参考文献:

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-10. (Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A Review on the Effect of Large-scale PV Generation on Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-10.)
- [2] 艾欣, 韩晓男, 孙英云. 光伏发电并网及其相关技术发展现状与展望 [J]. 现代电力, 2013, 30(1): 1-7. (Ai Xin, Han Xiaonan, Sun Yingyun. The Development Status and Prospect of Grid-connected Photovoltaic Generation and Its Related Technologies [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 1-7.)
- [3] Park M, Yu I. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 2004, 19(1): 164-169.
- [4] Chakraborty C, Ho-ching I H, Dah-chuan L D. Power converters, control, and energy management for distributed generation [J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on (S1551-3203), 2015, 62(7): 1552-1554.
- [5] 焦阳, 宋强, 刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 198-202. (Jiao Yang, Song Qiang, Liu Wenhua. Practical Simulation Model of Photovoltaic Cells in Photovoltaic Generation System and Simulation [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 198-202.)

- [6] 姚志清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81. (Yao Zhiqing, Zhang Qian, Liu Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.)
- [7] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 具有改进最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 94-100. (Zhou Dejia, Zhao Zhengming, Yuan liqiang, et al. Implementation of a Photovoltaic Grid-connected System Based on Improved Maximum Power Point Tracking [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 94-100.)
- [8] Nattapong Chauyawatto, Krissanapong Kirtikara, Veera-pol Monyakul, et al. DC-AC switching converter modelings of a PV grid-connected system under islanding phenomena [J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2009, 34(12): 2536-2544.
- [9] 王成山, 杨占刚, 武震. 一个实际小型光伏微网系统的设计与实现 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 6-10. (Wang Chengshan, Yang Zhangang, Wu Zhen. Design and realization of practical photovoltaic microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 6-10.)
- [10] 周林, 贾芳成, 郭珂, 等. 采用 RT-LAB 的光伏发电仿真系统试验分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2814-2820. (Zhou Lin, Jia Fangcheng, Guo Ke, et al. Testing Analysis on a Kind of PV Generation Simulation System Using RT-LAB [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2814-2820.)
- [11] 黄鑫, 易映萍, 范丽君. 大功率光伏并网发电系统 RTDS 的建模与仿真 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 32-37. (Huang Xin, Yi Yangping, Fan Lijun. RTDS modeling and simulation of high power photovoltaic grid-connected current controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 32-37.)
- [12] Blanchette H F, Ould-bachir T, David J P. A state-space modeling approach for the FPGA-based real-time simulation of high switching frequency power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2012, 59(12): 4555-4567.
- [13] Gregoire L A, Fortin-blanchette H, Al-haddad K, et al. Real-time simulation of modular multilevel converter on FPGA with sub-microsecond time-step [C]// Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE. USA: IEEE, 2014: 3797-3802.
- [14] Esram T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 2007, 22(2): 439-449.
- [15] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 91-94. (Liu Bangyin, Duan Shanxu, Liu Fei, et al. Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Based on Improved Perturbation and Observation Method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 91-94.)
- [16] 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 Ziyong, Yu Hang, Yan Gangui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.)
- [17] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20. (Wang Chengshan, Li Yan, Peng Ke. Overview of Typical Control Methods for Grid-Connected Inverters of Distributed Generation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2): 12-20.)
- [18] Kim Seul-Ki, Jeon Jin-Hong, Cho Chang-Lee, et al. Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis [J]. Solar Energy (S0038-092X), 2009, 83(5): 664-678.
- [19] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 电力电子装置典型模型的适应性分析 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 63-68. (Wang Chengshan, Gao Fei, Li Peng, et al. Adaptability Analysis of Typical Power Electronic Device Model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 63-68.)