

微电网中微电源接口仿真模型的研究与比较

王 阳, 鲁宗相, 闵 勇

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084)

摘要: 与传统的大电网不同, 微电网中绝大部分微电源采用了电力电子器件与电网互联, 电力电子器件的引入给微电网系统的仿真带来了许多新的问题, 而微电源和电网接口的处理方法是仿真的核心问题。文中介绍了 3 种微电源接口模型, 分别是逆变器接口模型、电压源接口模型和电流源接口模型, 并以太阳能发电系统为例, 在 PSCAD/EMTDC 软件中建立了逆变器接口和电流源接口, 分析和比较了这 2 种接口模型的响应特性、计算速度和精度等技术指标, 阐述了电压源接口模型在 PSCAD/EMTDC 仿真中的局限性, 给出了 3 种模型的应用场合。

关键词: 微电网; 微电源接口; 仿真

0 引言

近年来, 全球能源危机日益加重, 很多国家都开始加快新能源研究的步伐。为了解决分布式电源(DG)接入成本高、控制困难等问题, 并充分发挥其积极辅助作用, 美国电力可靠性解决方案协会(CERTS)率先提出微电网的概念, 以系统的观点看问题, 将各种 DG、负荷、储能装置及控制装置结合起来形成一个单一可控的单元, 并向用户供电和热, 这样的系统可以为负荷提供多样化的电能质量需求。微电网通过其与大电网的公共连接点(PCC)可以灵活地接入和切出配电网, 作为一个整体模块不会对大电网产生不利影响, 无需修改大电网运行策略^[1], 成为智能电网的一个重要组成部分^[2]。

与传统大电网不同, 微电网中包含各种形式的微电源, 如太阳能、风能、生物质能、燃料电池等, 其中很多能源转换为电能后输出一般为直流或高频交流电, 需要利用电力电子装置变换为电网可用的交流电^[3], 这给微电网系统的仿真带来了许多新的难题。本文主要研究 3 种微电源接口模型: 逆变器模型、电压源等效模型和电流源等效模型, 并给出了它们的结构和设计方法。

1 微电源接口仿真方法

与传统大电网不同, 微电网中绝大部分微电源需要通过电力电子装置与电网接口, 并且微电网的

“大机小网”特点突出, 因此, 仿真工具的选择、微电源接口的设计、仿真模型的建立都具有与大电网仿真不同的特点。目前常用的微电网仿真工具有 MATLAB/Simulink, PSCAD/EMTDC, RTDS 等。

在仿真软件中, 微电源一般利用代数方程来模拟, 而电网模型常常直接用仿真软件提供的工具包(如 MATLAB 中的 power system toolbox)来建立。如何设计微电源与电网的接口模型, 已成为仿真研究的一个难点所在。

在仿真中有 3 种方法来连接微电源模型和电网模型: 第 1 种方法按照实际电路的拓扑结构, 应用电力电子变换电路作为接口, 能够准确模拟实际系统, 但结构复杂; 第 2 种方法通过等效电压源作为接口, 考虑了逆变器的控制策略, 忽略了电力电子开关暂态; 第 3 种方法直接利用微电源的外特性, 采用等效电流源作为接口, 这种方法设计简单, 但忽略了一些系统动态特性。

2 太阳能模型及其接口设计

2.1 太阳能电池特性

微电网中微电源的种类很丰富, 包括风力发电、太阳能发电、燃料电池等。太阳能电池噪声低, 运行可靠, 维护费用低, 其作为一种重要的替代化石燃料的“绿色”新能源, “减排”效益显著, 每 100 万用户装上太阳能, 可使 CO₂ 排放减少 430 万 t, 相当于减少 85 万辆汽车的 CO₂ 排放量, 因此在世界范围内得到了大面积的推广^[4]。太阳能电池模型等效电路如图 1 所示。

太阳能电池的输出特性满足^[5]:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp\left(\frac{q}{nkT}(V + R_s I)\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-09-27。

长江学者和创新团队发展计划资助项目(PCSIRT); 国家自然科学基金优秀国家重点实验室专项基金资助项目(50823001); 国家电网公司科技项目“微网技术体系研究”。

式中: I_{ph} 为光生电流; I_0 为二极管饱和电流; 单位电荷 $q=1.6 \times 10^{-19}$ C; n 为二极管因子; 波尔兹曼常数 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为光伏电池表面绝对温度; R_s 为光伏电池串联等效电阻; R_{sh} 为光伏电池并联等效电阻; h 为普朗克常数; ν 为光子频率。

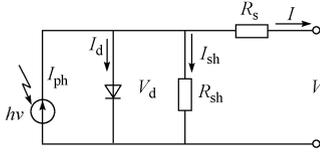


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of PV module

在工程应用中,一般忽略串、并联电阻的影响,将式(1)简化为式(2)来表示光伏特性曲线^[5]:

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

式中:

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

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

I_m, V_m 分别为太阳能电池工作在最大功率点的电流和电压; I_{sc}, V_{oc} 分别为太阳能电池的短路电流和开路电压。

利用式(2)在 MATLAB 中仿真不同环境温度和日射强度下的太阳能电池功率-电压($P-U$)曲线。图 2 所示为环境温度 $t=30^\circ\text{C}$ 时,不同日射强度下的 $P-U$ 曲线;图 3 所示为日射强度 $S=1\,000\text{ W/m}^2$ 时,不同环境温度下的 $P-U$ 曲线。

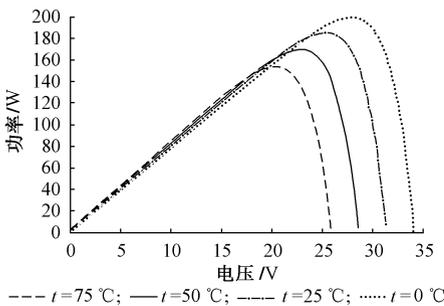


图 2 不同温度下光伏阵列的 $P-U$ 曲线

Fig. 2 $P-U$ characteristics of PV module with temperature variation

从图 2 和图 3 可以看出,太阳能功率特性存在一个最大值,为了充分利用太阳能,需要进行最大功率点跟踪(MPPT),目前常见的 MPPT 方法有爬山法、增量电导法、开路电压或短路电流法、有限元法、模糊神经网络法、功率匹配法和曲线拟合法等^[6]。本文采用简单、有效的增量电导法,利用太阳能输出

功率与电压的微分来判断太阳能电池工作区域进而寻找最大功率点和系统响应较迅速,实现起来简单可靠。

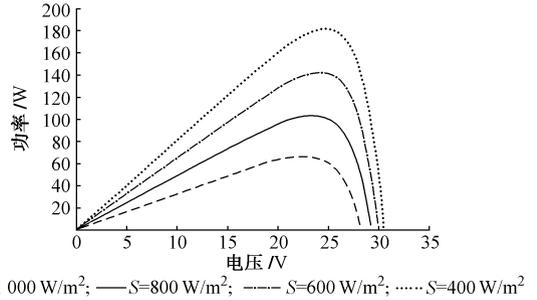


图 3 不同光照下光伏阵列的 $P-U$ 曲线

Fig. 3 $P-U$ characteristics of PV module with irradiation variation

2.2 太阳能与电网接口模型

在实际系统中,太阳能发电系统一般采用 2 级电力变换器实现:第 1 级为直流/直流(DC/DC)变换器,用于实现太阳能输出电压的变换和 MPPT 控制;第 2 级为并网逆变器,将直流电变为交流电接入电网^[7]。

第 1 级采用 Boost 升压电路,用于实现升压以及光伏阵列的 MPPT 控制。第 2 级采用电压源型逆变器,将直流电变为交流电送入电网,逆变器控制其直流侧电压恒定,并控制输入电网的无功功率。

逆变器常常采用矢量控制策略,其控制框图如图 4 所示。

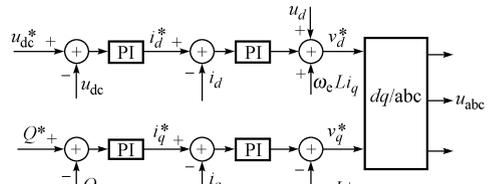


图 4 矢量控制框图

Fig. 4 Block diagram of vector control

根据逆变器直流侧电压误差信号可得到 d 轴电流的参考值,根据无功输出误差信号可得到 q 轴电流参考值, dq 轴电流参考值通过电流环得到电压控制信号,最后将电压信号调制后得到脉宽调制(PWM)控制波形^[8]。

3 太阳能接口仿真模型

太阳能发电系统接口的仿真模型可以按照实际电路的拓扑结构,通过电力电子变换电路与电网互联,这种方法以下简称“逆变器接口”;也可以用等效电压源和电网接口,控制仍然采用电力电子变换电路的控制策略,这种方法以下简称“电压源接口”;还

可以直接利用微电源的外特性,采用等效电流源作为接口,这种方法以下简称“电流源接口”。本文在PSCAD/EMTDC仿真平台上实现微电源接口的逆变器模型和电流源模型。

3.1 逆变器接口

3.1.1 仿真模型组成及其控制

逆变器接口的组成如图5所示。

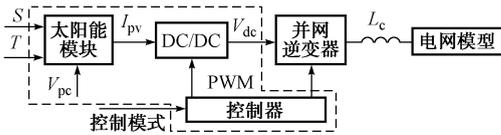


图5 光伏系统电力电子接口仿真模型
Fig.5 Inverter interface model of PV system

图中太阳能模块的输入量为日射强度 S 、环境温度 T 以及太阳能电池输出电压 V_{pv} , 输出量为太阳能的输出电流 I_{pv} , L_c 为逆变器的输出电感。太阳能特性采用式(2)描述。DC/DC 电路和并网逆变器结构与实际的电力电子拓扑相同。

图5中控制器的控制模式有以下3种:

1) MPPT 控制。在 DC/DC 变换器中实现对太阳能的 MPPT 控制, 相应的逆变器控制策略为电压-无功(Q - V)控制, 这种控制可使太阳能以最大效率发电, 应用最为广泛。

2) 恒功率控制。当光照充足时, DC/DC 变换器可控制太阳能以恒定功率输出, 相应的逆变器控制策略为有功-无功(P - Q)控制, 这种控制使太阳能对电网来说相当于一个单一可控的电源, 便于电网进行调度控制。

3) 最大无功功率输出控制。当电网出现故障且需要大量无功支撑时, 采用这种控制模式。

3.1.2 仿真实现

太阳能模块的输出电流通过电流源加到 Boost 电路上, 再通过三相电压源型逆变器接入电网。电网模型用恒频、恒压的三相电压源表示。

若控制器输入的控制模式为 MPPT 模式, 控制器根据太阳能的特性曲线关系式, 用增量电导法计算出太阳能对应于最大功率点处的电压, 从而计算出 DC/DC 变换器中电力电子开关的占空比信号, 通过对 DC/DC 变换器进行控制, 使太阳能模块按最大功率输出。相应地, 逆变器的控制策略是维持逆变器直流端电压恒定, 控制器根据图4所示的控制策略计算出逆变器6个桥臂的 PWM 信号, 使太阳能输出的有功功率全部送往电网, 并按给定的无功功率参考值向电网发送无功功率。其中进行 dq 变换所需的相角由锁相环(PLL)计算得到。

3.2 电压源接口

3.2.1 仿真模型组成及其控制

电压源接口的组成框图如图6所示。这种模型将并网逆变器表示成三相电压源。

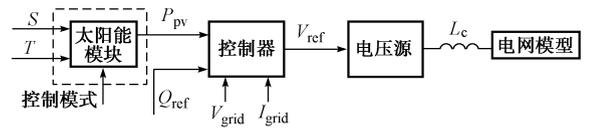


图6 光伏系统电压源接口仿真模型
Fig.6 Equivalent voltage source interface model of PV system

图中太阳能模块的输入量为日射强度 S 、环境温度 T 以及控制模式选择信号。MPPT 模式下, 控制器的控制策略与逆变器接口模型相同, 但图4的电压环在此变为有功功率环, 将控制得到的开关信号计算成电压幅值、频率和相角输出并作为电压源的被控量。

逆变器接口模型中需要建立详细的2级电力电子变换电路, 而电压源接口模型用电压源代替电力变换电路, 使系统更为简化。

3.2.2 仿真实现

与逆变器接口模型不同, 电压源接口模型仿真中需要用到可控电压源。而采用电力电子变换电路的控制策略, 在暂态过程中输出的波形不一定为标准的正弦波。考虑到 PSCAD/EMTDC 中电压源输出的电压波形只能为标准正弦波, 可控电压源仿真模型需要自定义实现。

3.3 电流源接口

3.3.1 仿真模型组成及其控制

电流源接口的组成框图如图7所示。这种模型中, 并网逆变器表示成三相电流源。

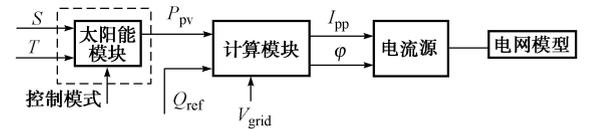


图7 光伏系统电流源接口仿真模型
Fig.7 Equivalent current source interface model of PV system

图中太阳能模块的输入量为日射强度 S 、环境温度 T 以及控制模式选择信号。与逆变器接口不同的是, 电流源接口中太阳能模块的输出为有功功率值。太阳能模块的控制模式与逆变器模型相似, 可以采用 MPPT 控制, 也可以采用恒功率控制。计算模块根据太阳能模块输出的有功功率、给定的无功功率参考值和测得的电网电压计算三相电流源的电流幅值 I_{pp} 和相角 φ 。

逆变器模型和电压源模型中需要详细的逆变器

控制策略,而电流源模型中假设太阳能功率全部输入电网,仿真中不需要专门设计控制策略。

3.3.2 仿真实现

太阳能模块实现方式与电压源模型相同,MPPT 等控制算法都需要直接在太阳能模块中实现。电流源由 3 个可控电流源组成。电网模型仍用恒频、恒压的三相电压源表示。

在 MPPT 控制模式下,太阳能模块内部利用太阳能模块输出特性寻优得到最大功率值,输出太阳能模块的最大功率,通过计算模块得到电网侧的电流幅值和相角,将其作为 3 个可控电流源的控制量,将太阳能模块输出的最大功率和给定的无功功率送向电网。

4 仿真结果比较

4.1 外部环境变化时系统动态响应比较

首先给出在外界环境变化时 2 种模型的动态响应。当外界光照阶跃变化,控制器采用 MPPT 控制模式时,逆变器接口和电流源接口的仿真结果分别如图 8、图 9 所示。环境温度为 12 °C,日射强度 S 从 500 W/m² 突变至 800 W/m²,图中从上到下分别是日射强度变化曲线、太阳能模块输出电流波形以及太阳能模块的输出功率曲线。

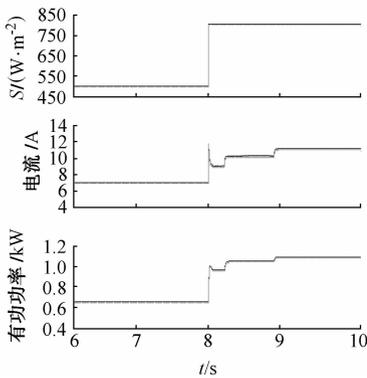


图 8 逆变器接口模型光照变化时的系统响应
Fig. 8 System responses of inverter interface model with irradiation variation

可见,当光照阶跃变化时,逆变器接口太阳能模块输出电流从 6.99 A 变为 11.5 A,输出功率从 655 W 变到 1 105 W。图 8 的曲线给出了电流和功率的跟踪过程,其功率跟踪速度与算法步长有关。

图 9 中当光照阶跃变化时,太阳能模块输出电流从 7.13 A 突变为 11.5 A,输出最大功率从 715 W 突变为 1 206 W。可见,电流源模型是一种理想模型,电流和功率的跟踪都是瞬间完成的,没有动态过程。

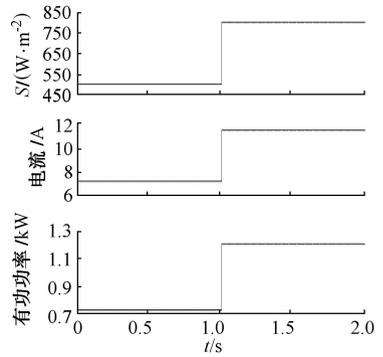


图 9 电流源接口模型光照变化时的系统响应
Fig. 9 System responses of current source interface model with irradiation variation

对比结果可知,2 种模型的误差约为 8%,这是因为逆变器接口中各电力电子开关为非理想器件,存在开关损耗,且用增量电导法进行 MPPT 时,同步长为固定值,寻到的可能为局部最大功率点,而非全局最大功率点。而采用电流源接口,各元件均为理想元件,不存在开关损耗,MPPT 控制策略用程序实现,可达到很高的精度,因而输出的值均为理想值。

4.2 无功给定变化时系统动态响应比较

当外部环境恒定,无功给定值从 0 var 阶跃到 500 var,太阳能模块输入 MPPT 控制模式信号时,采用逆变器接口和电流源接口的仿真结果分别如图 10、图 11 所示。环境温度为 12 °C,日射强度为 500 W/m²,图中从上到下分别是无功功率参考值和实际值变化曲线、电网侧电流 I_{grid} 波形、电网侧电流有效值 I_{RMS} 曲线、太阳能模块的输出功率。

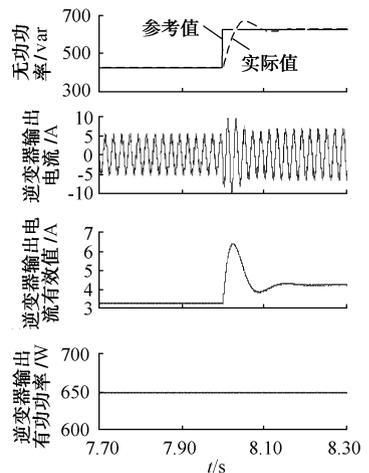


图 10 逆变器接口模型无功功率给定变化时的系统响应
Fig. 10 System responses of inverter interface model with reactive power reference variation

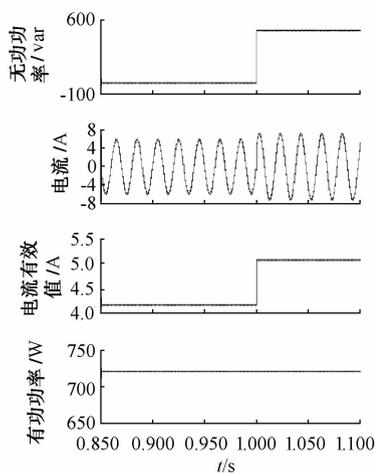


图 11 电流源接口模型无功功率给定值变化时的系统响应

Fig. 11 System responses of current source interface model with reactive power reference variation

从图 10 可见,当无功功率给定值从 0 阶跃变化到 500 var 时,电网侧电流有效值从 3.3 A 变化为 4.4 A。而图 11 中电网侧电流有效值从 4.1 A 突变为 5.0 A。在 2 种模型下,系统无功功率在稳态时相同,但因为开关损耗的存在和 MPPT 控制实现方式的不同使得稳态时两者有功功率有差别,因而测得的电网侧电流有误差。

对比图 10、图 11 可知,2 种模型都可跟踪无功功率参考值的变化,但采用逆变器模型可以准确反映逆变器的调节过程,而采用电流源模型时,无功功率和电流呈阶跃变化。

4.3 应用场合

通过上面的分析和比较可以看出,采用逆变器模型可以准确反映电力电子开关和控制器的动态过程,仿真结果与实际结果贴近,但其结构复杂且仿真时间较长,适用于控制器设计、微电网暂态仿真等场合。

在 PSCAD/EMTDC 中由于其软件库模型限制,较难实现电压源接口的仿真。但这种模型结构简单,能研究控制算法,适用于不考虑电力电子开关过程但考虑电力电子变换器控制算法的场合。

采用电流源模型时,系统结构简单灵活,容易实现,并且仿真速度快。但仿真结果过于理想,不能准确反映控制器动态。这种模型可以用在仅需微电源外特性、时间尺度较长的应用场合。

在实际应用中,有时既要求准确反映控制器动态和电力电子开关暂态,又对仿真时间要求高,可以通过改进程序来提高电流源接口模型和电压源接口模型描述精度来实现,也可以采用 RTDS 来仿真。微电网中小容量电源的电力电子变换电路开关

频率一般为 5 kHz~10 kHz,而由于实时数字仿真器仿真步长的限制,在电力电子开关频率大于 3 kHz 时难以准确反映其暂态过程,且成本较高。如果要兼顾模型准确性、电力电子开关过程和仿真时间,可用现场可编程阵列 (FPGA) 来搭建仿真平台^[9]。

5 结语

本文以太阳能发电系统为例介绍了微电网中微电源与电网接口的逆变器接口模型、电压源接口模型和电流源接口模型,并通过仿真比较了逆变器接口模型与电流源接口模型的动态响应。逆变器接口模型仿真速度较慢,系统结构和控制较复杂,但能反映电力电子暂态过程,适用于需要考虑电力电子暂态特性且系统规模不大的场合中。电压源模型复杂度介于逆变器模型与电流源模型之间,适用于着重设计控制算法的场合。电流源模型响应速度非常快,系统结构简单,但结果过于理想,适用于着重考虑微电源外特性的场合。

参考文献

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 25-34.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 25-34.
- [2] 李淑森,杨迎建,吴夕科,等. 配电技术概况及发展趋势. 高电压技术, 2008, 34(1): 113-122.
LI Shusen, YANG Yingjian, WU Xike, et al. Overview and development trend of distribution technology. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 113-122.
- [3] SURYANARAYANAN S, MITRA J. Enabling technologies for the customer-driven microgrid// Proceedings of 2009 IEEE PES General Meeting, July 28, 2009, Calgary, Canada.
- [4] JIANG Zhenhua, RAHIMI-EICHI H. Design, modeling and simulation of a green building energy system// Proceedings of 2009 IEEE PES General Meeting, July 28, 2009, Calgary, Canada.
- [5] PARK J H, AHN J Y, CHO B H, et al. Dual-module-based maximum power point tracking control of photovoltaic systems. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1036-1047.
- [6] LEYVA R, ALONSO C, QUEINNEC I, et al. MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 249-258.
- [7] 黄燕艳,倪建华,施围. 电力电子器件在分布电源中的应用. 高电压技术, 2002, 28(2): 29-31.
HUANG Yanyan, NI Jianhua, SHI Wei. The application of power electronic devices in distributed power-supply systems. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 29-31.

(下转第 93 页 continued on page 93)

- [8] MATAR M, IRAVANI R. An FPGA-based real-time digital simulator for power electronic systems// Proceedings of International Conference on Power Systems Transients, June 4-7, 2007, Lyon, France.
- [9] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.

方向:微电网技术。E-mail: wang-yang07@mails. tsinghua. edu. cn

鲁宗相(1974—),男,副教授,主要研究方向:电力系统可靠性分析、风力发电、分布式发电及微电网。E-mail: luzongxiang98@tsinghua. edu. cn

闵勇(1963—),男,教授,主要研究方向:电力系统稳定分析、分布式发电及微电网。E-mail: minyong@tsinghua. edu. cn

王阳(1985—),女,通信作者,博士研究生,主要研究

Research and Comparison of DG Interface Simulation Models in a Microgrid

WANG Yang, LU Zongxiang, MIN Yong

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Different from traditional power system, power electronics devices are widely used in microgrid to connect distributed generation (DG) to the power grid. As a result, many new problems are founded in the microgrid simulation. One of the most important problems is the interfaces design of DGs. This paper introduces the inverter interface model, equivalent voltage source interface model and equivalent current source interface model. The design and analysis of the three methods are given with PV as an example. Details of these methods such as response characteristics, calculation speed and precision are compared using PSCAD/EMTDC. The application of the three interface models are given as the conclusion.

This work is supported by Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (PCSIRT), National Natural Science Foundation of China for Excellent State Key Laboratory (No. 50823001) and State Grid Coporation of China.

Key words: microgrid; distributed generation interface; simulation