

Microgrid Modeling and Stability Analysis: A Review

Yiwei Feng, Xin Wang, Zhijun Wu

Department of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Email: ywfeng@yeah.net, wangxin143512@163.com, iszhijunwu@yeah.net

Received: Apr. 26th, 2020; accepted: May 11th, 2020; published: May 18th, 2020

Abstract

Microgrid is an important support of distributed energy application technology, and effectively perfects the structure of large power grid. This paper first makes a brief review of the latest development and structure of the smart micogrid. The classic topology diagram of the smart micogrid is analyzed, and the system composition and operating characteristics are summarized and analyzed. Meanwhile, the modeling method, control strategy and stability analysis of microgrid are summarized and discussed. Finally, some problems existing in the modeling of micogrid system are discussed, and the future development of micogrid system is forecasted, which provides a theoretical basis for the application and popularization of micogrid.

Keywords

Microgrid, Modeling Method, Control Strategy, Stability Analysis

智能微网建模及稳定性分析综述

冯宜伟, 王 鑫, 毋智军

兰州理工大学, 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州

Email: ywfeng@yeah.net, wangxin143512@163.com, iszhijunwu@yeah.net

收稿日期: 2020年4月26日; 录用日期: 2020年5月11日; 发布日期: 2020年5月18日

摘 要

智能微网是分布式能源应用技术的重要支撑, 有效地完善了大电网体系架构。本文首先对智能微网的最新发展和结构做了简要回顾。分析智能微网的经典拓扑结构示意图, 并对其系统构成及运行特性进行了

总结与分析。同时归纳和讨论了智能微网的建模方法、控制策略及稳定性分析。最后讨论了智能微网系统目前在建模上存在的一些问题，对智能微网系统的未来发展进行了展望，为智能微网的应用推广提供了理论依据。

关键词

智能微网, 建模方法, 控制策略, 稳定性分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统配电模式下的电网互联和扩张, 凸显了传统电网的弊端, 难以满足用户越来越高的安全性和可靠性以及多样化的供电需求。此外, 发展中国家和发达国家的电网等基础设施都存在不同程度的老化现象[1]。与此同时, 化石燃料的枯竭, 环境污染日益严重等问题促进了分布式发电技术的发展, 使得分布式发电单元在现代电力系统中渗透率不断提高。但是由于分布式发电会对电网造成负面影响, 且不具备能量管理能力。此外, 计算机、通信系统和电动汽车对电力的新需求将使我们落后的电网面临巨大威胁, 需要一种有效、可靠和高效的手段来提供新能源以满足新需求; 智能微网作为一种有效的解决途径被提出[2]。

智能微网使分散的分布式发电单元通过通信技术与计算机技术和控制技术实现跨区域结合。文献[3]认为智能微网是大型电力系统现代化、小型化的形式, 能够提高供电可靠性, 更易满足用户日益增长的用电需求。传统电网已经拥有相当成熟的控制策略和建模方法。但其建模方法可能并不适用于对智能微网系统进行建模, 智能微网包括多个子系统, 各个子系统在故障或必要时须退出/并入联网运行, 并且由于风力、光伏和其他可再生能源等出力具有很大的间歇性、随机性的特点, 其动态特性给智能微网系统的模型建立和稳定运行带来较大影响。可再生能源被引入电力系统, 由于其不可预测的特性, 以及这些分布式发电单元中微源类型、负荷类型、网络拓扑架构、电压等级和控制架构都有所不同, 集成到实际系统在技术上变得非常困难。综上所述, 若要对智能微网系统进行仿真和分析, 则有必要针对系统中的不同模块开发模型。如果这些模块中的任何一个状态发生变化, 那么模型应该能够动态地表示这种变化的行为, 特别是它们在不同状态之间的转换。关于智能微网的模型研究, 国内外学者提出了许多不同的方案。从整体和器件出发, 大致可以分为两类: 以核心器件建模以及整体系统建模两种[4]。文献[5]研究了应用于配电系统和微电网的不同类型三相变压器的小信号状态空间模型, 并基于变压器进行数学建模, 推导出当 DG 通过耦合电感连接时, 与通过变压器连接时, 系统状态空间表达式是不同的。但该建模方法只对其核心部件进行建模和控制, 而其他单元的状态不能有效反映和控制, 不能全面地描述微电网系统各部分的动态特性。关于整体系统建模方案, 目前可归纳为 3 种: 等效二端口网络模型和简化等效电路模型以及受控源模型。文献[6]建立了风光储微电网的 Matlab/Simulink 详细模型, 基于光伏电池和风力发电机工作的环境, 对温度、光辐射强度、风速的变化均进行了模拟, 文献按照微电网的各个组成部分分别对它们进行了等效化简建模并进行了仿真分析, 上述方法能够清晰反映微电网组成结构和模型结构, 但是该方法使得整体模型变得复杂冗余, 增加计算量。文献[7]提出了一种基于等效戴维南电路的逆变器

接口微电网建模新方法。该方法利用等效的戴维南电路来近似连接各个逆变器的整个网络。用动态的二阶 RL 支路代替静态阻抗,从而产生适当的瞬态,以提供更精确的微电网模型。从扰动大小和性质,针对微电网系统建立的数学模型可以分为约定条件下简化的小信号模型和大信号模型[8] [9]。目前有关微电网小信号建模的研究大多集中在电力电子变换器或与同步电机相结合的变换器上[10]。在这些研究中,推导了特定微电网和相关局部控制器的分析模型。然而,从实际的角度来看,整个微电网小信号模型的分析开发是相当复杂的。由此产生的动态模型,包括各个子系统的功率和控制阶段,通常会导致大量的状态变量;如果修改控制方案或微电网配置,可能需要进行重大的重新设计[11]。在小信号建模与分析中,线性化域的有效性和大小仅限于较小的扰动。显然,小信号近似意味着建模策略的局限性,特别是当功率变换器在两种工作模式的边界上工作时。因此,有必要用大信号非线性技术来研究微电网系统,以充分理解和检验其稳定性。微电网系统大信号建模通常采用时域仿真法和李雅普诺夫直接法。文献[12]研究了一种可再生电源与电网连接的变换器,提出了一种大信号黑箱建模方法来表征直流/交流变换器的非线性特性。提出了一种能考虑不同工况的大容量黑箱模型。此外,将大容量黑箱模型与具体的变换器切换模型进行比较,结果表明所提出的方法能较好地反映变换器在并网模式下的低频响应。随着社会和技术的不断发展,人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)成为当下的研究热门。人工神经网络能够模拟人脑智能化处理,实现多输入多输出的非线性映射,具有信息记忆、自主学习等功能,具有很强的自适应性及容错能力。文献[13]提出了一种基于 LSTM 递归神经网络的微电网等效建模方法。利用神经网络处理非线性系统的优点,解决了微电网的等效建模问题。其仿真结果表明,该模型可推广到电力系统建模的其他方向,以及微电网多场景运行的等效建模。但目前利用神经网络对微电网建模的研究还不是很多。此外,神经网络需要大量的参数,如网络拓扑结构、权值和阈值的初始值;当数据不充分的时候,神经网络无法进行工作。

智能微网的提出旨在实现分布式电源的灵活、便捷应用,解决数量庞大、形式多样的分布式电源并网问题,实现就近对负荷多种能源形式的高可靠供给,使传统电网向智能电网过渡[14]。智能微网将局域分布式电源、功率接口装置、储能系统及用户侧负载组织起来,将微电网分散的发电模式整合成一个整体进行管理,充分挖掘分布式电源的效率,实现自治运行。外部由传感器和通讯装置将分布式单元联合成一个局域系统;利用通讯设施和高效的数据管理使电网智能化,通过数据分析实现对电网故障的诊断和能源的管理调配[15]。通过智能微网实现多电源协同控制、分布式能源管理、用户参与负荷控制,极大程度实现动态能量就地平衡、电能质量优化控制,削峰填谷,降低新能源接入对大电网的影响,提高电力设施经济运行和电力调度控制性能,解决智能电网新能源接入面临的所谓分布式微型电源发电质量不高的新型电力体制建设面临的瓶颈问题,为智能电网新能源接入奠定基石,具有极为广阔的发展前景。

本文对现有智能微网的发展现状进行了描述,并对其结构和控制策略进行了介绍。在对智能微网的运行特性描述的基础上,进一步对微网模型的建立进行了阐述。最后,讨论了智能微网在实现过程中遇到的建模问题和控制问题。

2 智能微网结构及建模

2.1 智能微网的结构

图 1 是一种基于逆变器的微电网结构[16],逆变器是这种微电网的关键组成部分。微电网由多个 DG 单元、负载和存储设备组成。DG 单元包括逆变器接口光伏(PV)、燃料电池(FC)和风力发电厂。此外,发电机组通过同步发电机(SG)连接到网络。微电网与主网络的连接点称为公共耦合点(PCC)。

另一种微电网结构如图 2 所示[17]。微电网的典型结构中主要包含有几种主要的分布式电源,储能设备,能量和数据管理系统,测量和通讯设备,隔离开关,公共耦合点(PCC)接口,微电源保护装置。

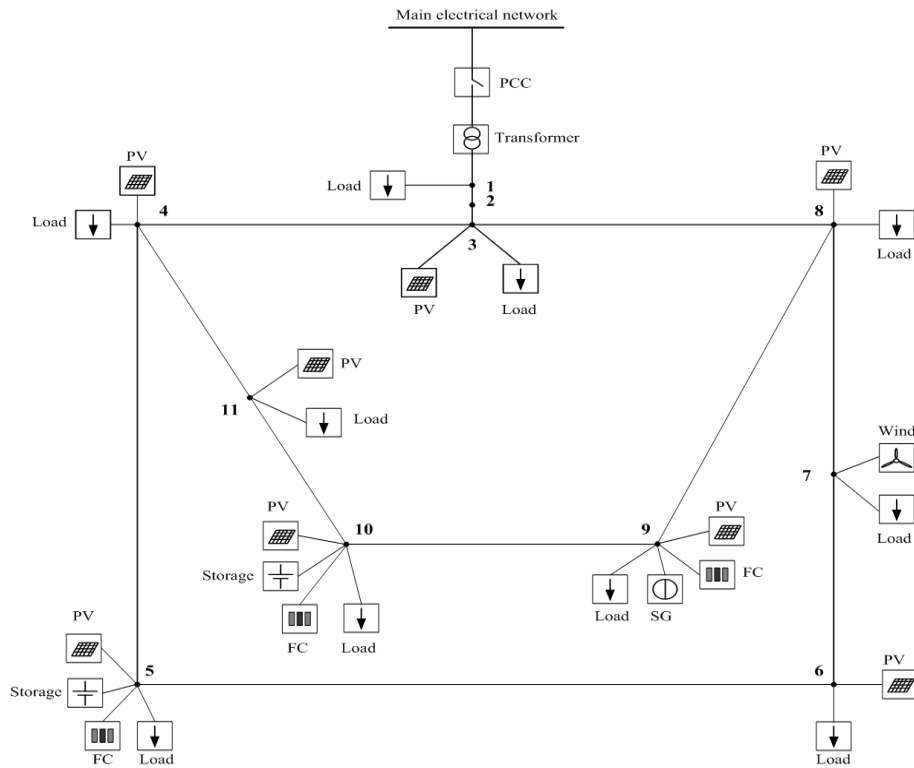


Figure 1. Based on the typical structure diagram of the inverter microgrid
图 1. 基于逆变器微电网典型结构图

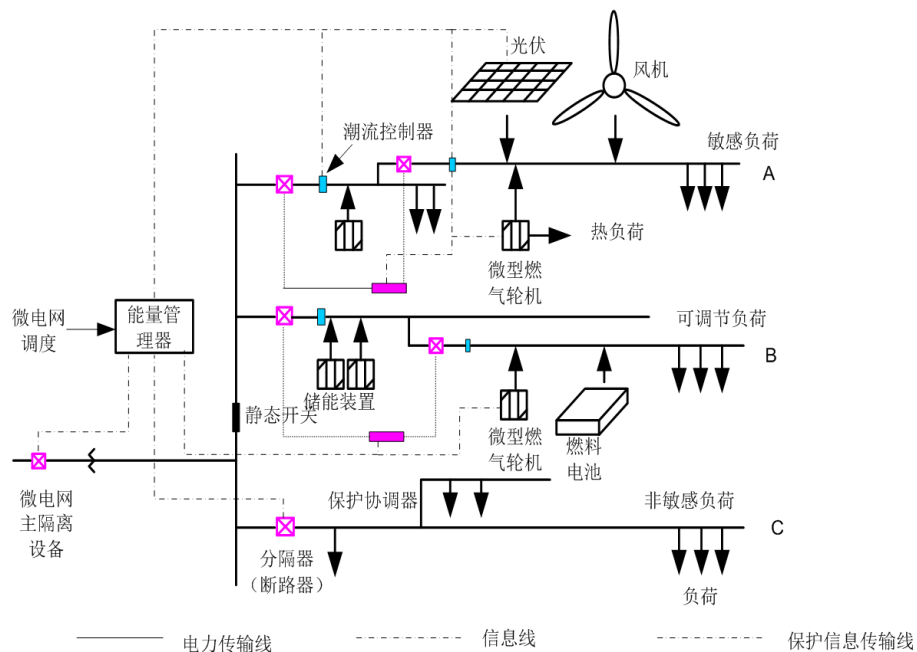


Figure 2. Typical structure of microgrid
图 2. 微电网典型结构

在该示例中，整个网络呈放射状，具有一条母线，三条馈线 A, B 和 C 以及一组负载。母线通过隔离开关设备在 PCC 处与电网相连。馈线通过静态开关与配电系统相连，可实现联网运行模式与离网运行

模式的平滑切换。馈线 A 上连接有敏感负荷并安装有光伏电池和微型燃气轮机,通过光伏、风机、微型燃气轮机并配备大容量储能装置的微源系统供电;微型燃气轮机还可以将废热提供给热能负载。馈线 B 可连接一级负荷或者可调节的负荷,通过微型燃气轮机或者燃料电池供电保证负荷的正常运行。对连接在 C 上的非敏感负荷,可以采用其他微源或者母线供电方式保证负荷正常运转。在这种模式下,每条重要负荷的馈线上就有两种供能方式保证敏感或重要负荷的运行。离网情况下微电网内部过负荷运行时,可切断系统对 C 的供电。当区域电网出现故障或者电力质量问题时,微电网可以在 PCC 处通过主断路器切断与电网的连接,使微电网在离网模式下运行。如果离网情况下无法保证电能的供需平衡,可以断开馈线 C,对非敏感负荷停止供电,以保证敏感负荷的正常运行。在主网恢复正常,符合并网条件的情况下,闭合隔离开关进入并网运行模式。每条馈线都有断路器、潮流控制器以及相应的保护装置,以实现整体微电网和其中相关设施的控制和保护,保证系统的平稳运行。

智能微网即微电网的智能化,它融合了先进的电力技术、计算机技术、通信技术和控制技术,满足电网对未来电力、环境、能源、和经济的更高发展要求。智能微网的结构应当在传统设施的基础上增加基于不同媒体和技术的通信架构以及响应应用程序和服务,使微电网自身、多个微电网以及微电网与配网之间的信息交换变得实时互动。此外,为了促进可再生能源与电力系统的一体化,确保系统供需平衡,提高响应能力和可靠性,优化网络运行,必须设计和建立通信和数据管理基础设施,实现信息通信、能源调度、稳定性控制并收集用户用电数据,分析用户用电习惯,智能计量,精准供能,使能源利用最大化。

2.2. 智能微网建模

2.2.1. 均值模型

在微网中,电力电子器件的切换可以用非常小的时间步长进行精确建模。然而,如果微电网中包含大量的电力电子设备,那么详细建模方式将会涉及极大的计算量。很明显,智能微网就是包含了大量的电力电子设备的发配电系统。为了解决这一难题,电力电子领域提出了均值建模方法。均值建模法的原理是用电压和电流在一定时间间隔内的平均值代替瞬时值来表示电力电子器件的动态特性。与详细建模方法相比,均值建模方法可以使用更大的时间步长,仿真速度更快。均值模型的建立方法主要有状态空间平均法(State-Space Averaging, SSA)和开关函数法两种[18] [19]。与开关函数法相比,状态空间平均法更简洁有效,得到了广泛的应用。均值建模的目标是用连续块代替不连续的开关单元,连续块表示开关单元在一个开关区间内的平均行为。一般来说,需要对开关单元进行详细的分析,并对转换器波形进行精确的平均,才能建立它们的平均值模型。均值建模的方法是建立每个开关配置的状态空间方程,然后用占空比对不同模式进行加权,得到各切换周期状态变量的平均值,最后进行线性化处理,得到小信号模型。如占空比为 d_i 的 PWM 变换器,均值法模型如下:

$$\langle \dot{x}(t) \rangle = \left(\sum_i^n d_i A_i \right) M \langle x(t) \rangle + \left(\sum_i^n d_i B_i \right) u \quad (1)$$

其中 x 是状态向量, u 是输入向量, y 是输出向量。

总之,SSA 是广泛使用的方法,因为它的简单性和良好的性能适用于符合其条件的系统模型。然而,SSA 模型存在一定的局限性。由于忽略了开关频率的波动及其谐波,导致开关频率影响模型的精确性。为了解决这些问题,提出了广义状态空间平均法(Generalized State-Space Averaging, GSSA) [20]。GSSA 模型是状态空间平均模型的扩展,通过傅里叶级数对系统状态变量进行扩展,保留了直流分量和高阶项。它提供了一种更通用的状态空间平均模型,能够更准确地表示电路的状态变量波形。在 GSSA 方法中,电路状态变量近似于具有时变系数的傅立叶级数展开式。模型中所涉及的谐波阶数越大,其结果越接近电路微分方程组的精确解,因此 GSSA 方法比 SSA 方法更精确。GSSA 模型能够更准确地描述变换器动

态特性对系统性能的影响,但仍不适用于分析交直流混合系统。基于 dq-变换的系统模型可用于分析交直流混合独立电力系统,但对电压变换器等环节的建模过程较为复杂。因此,将 GSSA 方法与 dq 变换方法相结合,提出了一种 dq 坐标系下的 GSSA 建模方法,这是建立交直流混合独立电力系统大信号模型的有效途径[21]。

2.2.2. 离散模型

直流微网的模型很多是围绕变换器展开的。在大多数实际应用中,开关功率变换器的建模方法是基于连续时间平均法的,这种方法已被广泛接受。然而,这种方法不仅忽略了开关功率变换器的非线性特性,而且不能准确地研究数字控制系统中固有的控制时延。与传统的模拟控制相比,数字控制具有明显的优势,包括提高可靠性和抗噪声能力,控制精度高,更大的设计灵活性,以及更容易的监测和诊断接口[22]。智能微网系统模型本身具有非线性特性,为便于进一步的研究,通常都从线性的角度进行近似研究,将得到的线性系统离散化得到系统的离散模型。针对直流系统的非线性稳定性分析,离散时间方法更加适合。

在状态空间中,系统可以表示为以下形式:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= f(u, X) \\ Y &= g(u, X)\end{aligned}\quad (2)$$

其中 X 为状态向量; Y 是输出向量; u 是输入向量; f 和 g 是描述系统的两个函数。为了简化这两个方程,我们可以把它们转换成线性系统的离散形式。用矩阵表示式中 X 、 Y 、 u 的关系:

$$\begin{aligned}X(k+1) &= A_f X(k) + B_f u(k) \\ Y(k) &= C_f X(k) + D_f u(k)\end{aligned}\quad (3)$$

当且仅当状态矩阵 A_f 的所有特征值的绝对值都小于 1 时,系统是稳定的。

数字控制将离散时间建模方法扩展到考虑采样、调制器效应和延迟的数字控制变换器中,得到的结果是适用于任何 PWM 变换器的小信号离散时间模型[23]。文献[24]提出了一种简化的开关功率变换器离散时间建模方法。该方法将状态空间平均与离散时间建模技术相结合,有效地解决了离散时间模型的复杂性问题,同时保留了快速动力学分析的实用性。当开关频率较高时,所得到的简化离散时间模型较好地保持了精确离散时间模型的精度。进一步证明,简化的离散时间模型由于其明显的简单性,在稳定性预测和数字控制设计方面更加方便。

在工程实践中,对 DC-DC 变换器的分析建模大多采用传统的线性分析方法,如平均状态空间法,而 DC-DC 变换器是典型的非线性开关系统。传统的线性分析方法有时不能满足系统设计的要求或者是无效的,使得实际电路中会出现一些奇异或不规则的现象,需要一种非线性分析方法对变换器进行建模和稳定性分析。描述函数方法是一种非线性方法,相比于解析法和相平面法以及开关信号流图法,描述函数法能够在分析和建模过程中考虑系统切换过程中的非线性,更准确地对模型进行描述和分析[25]。描述函数法又称调和线性化法,是非线性系统的近似解析法。描述函数法的基本思想是在输入正弦信号的情况下,用输出的一阶谐波来代替每一个非线性环节,从而推导出频率特性。

如图 3 所示,从非线性模型中,特征方程可以表示为

$$1 + N(A)G(j\omega) = 0 \quad (4)$$

由式(4)可得

$$G(j\omega) = -1/N(A) \quad (5)$$

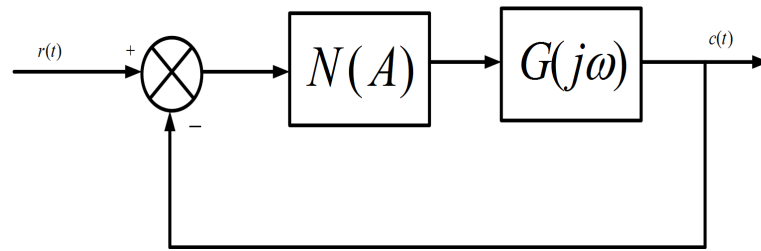


Figure 3. The nonlinear model of the system
图 3. 系统非线性模型

描述函数法可以将系统分为线性部分 $G(j\omega)$ 和非线性部分 $N(A)$ ，通过 Nyquist 图确定两条曲线的位置关系来分析和判定系统的稳定性。在实际工程应用中，如果 $G(j\omega)$ 轨线和 $N(A)$ 轨线出现相切的情况，那么由描述函数法得出的结论可能会出现错误。与线性离散方法相比，描述函数法极大简化了系统稳定性判定的繁杂程度，给出了系统稳定性的判据，有效解决大量与极限环有关的实际控制问题，但是描述函数法对使用条件有一定的要求，对于系统控制器的设计和性能分析方面作用不是很大。

2.2.3. 黑盒模型

随着可再生能源和储能元件的广泛应用，对直流负载的供电变得相当方便，然而这种行为高度依赖高集成度的电力电子转换器。但是在实际应用中，电力电子设备的模型或者系统通常包括来自不同制造商的电源转换器。由于设备或系统的保密性，相关设计人员无法获知关于转换器内部结构的详细数据。因此，传统的基于功率变换器的“结构模型”（如平均模型或开关模型）不能使用，因此，黑箱建模方法的提出对系统模型的建立和分析是必要的[26]。这种策略是基于系统对特定扰动的响应分析和识别技术的应用。由于缺乏关于电力电子转换器内部结构及其控制回路的详细信息，因此黑箱建模对于分析由商业现货转换器(COTS)组成的系统的动态行为特别有效。智能微网电力系统包含了一种混合的交直流配电体系结构，可以为系统中的交直流负载独立供电，因此，需要多种功率变换器，如三相逆变器 and DC-DC 变换器。黑箱建模方法在直流变换器领域研究较多，其成果也较为丰富。根据模型能够再现的行为类型，可以将不同的建模方法分为线性、静态非线性和动态非线性模型。线性模型基于双端口结构，能够再现任何转换器在工作点附近的平均动态行为。其他方法侧重于预测器件的电磁干扰。静态非线性方法是基于块状结构的 Wiener-Hammerstein 结构。非线性包含在一个静态块中，而动态行为则由一个线性动态块表示。最后，动态非线性模型基于多面体方法，将不同平衡点附近的局部模型集成到非线性结构中[27]。但是在包含交直流混合微电网中，交直流转换器变得非常重要。在直流微电网中，它是最关键的元素，因为它是微电网与系统其余部分之间的连接点。在交流微电网中，它对应于电网和直流元件之间的接口，是系统的关键因素。通过考虑相当于直流系统的 dq 框架，可以将黑箱建模技术应用于交流系统。

黑箱建模方法中线性方法基于双端口结构，最常见的一种结构是逆混合参数(G-parameters, GP)模型，这些模型代表了电力电子变流器的输入 - 输出小信号动态行为。其中输入是输入电压和输出电流，而输出是输入电流和输出电压。小信号模型是基于叠加性的，一个线性系统对两个或两个以上输入的响应是每个输入单独贡献的和。通过辨识技术从输入变量和输出变量的响应所收集的数据中，可以识别出代表转换器行为的传递函数集合。等效电路及模型框图如图 4 所示[28]。

该模型可以表示为

$$\begin{bmatrix} v_o \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(s) & -Z(s) \\ Y(s) & H(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_m \\ i_o \end{bmatrix} \quad (6)$$

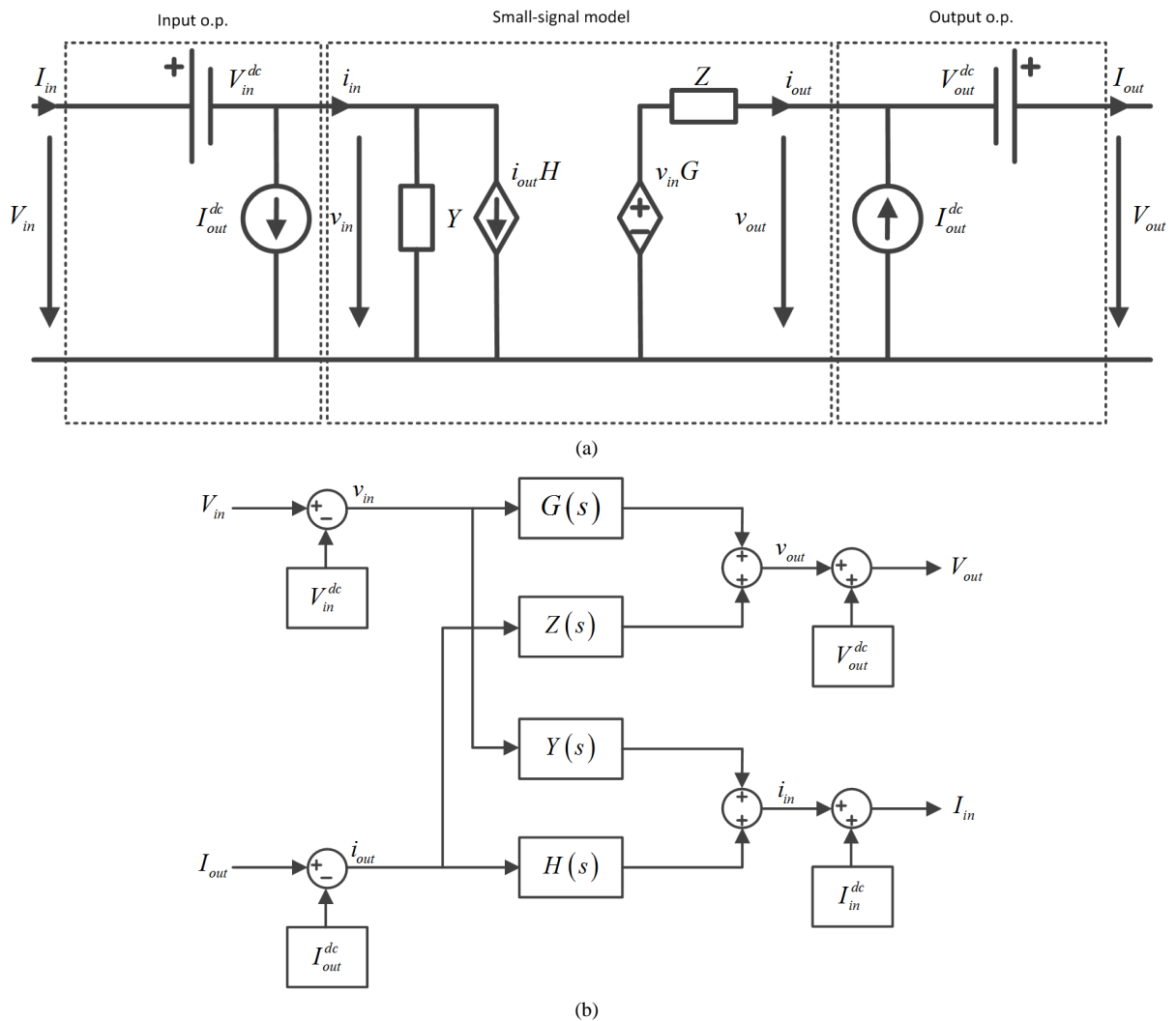


Figure 4. G-parameters model; (a) Equivalent electrical circuit, (b) Block diagram notation
图 4. GP 模型; (a) 等效电路; (b) 框图

其中, v 和 i 分别代表电压和电流, 下标 o 和 in 分别表示输出和输入。

GP 模型能较准确地反映直流电力电子变流器的输入端和输出端的小信号动态特性, 但是这类模型不能描述具有依赖于操作点的可变动态行为的转换器, 如果转换器的动态随操作点而变化, 则可以使用多面体建模方法。该模型不仅能够捕捉到影响稳态的非线性, 而且能够描述系统瞬态行为。多面体建模方法由不同操作点周围的局部模型组成。通过加权函数将各模型的响应作为工作点的函数进行加权, 将所有线性矩阵不等式(Linear Matrix inequalities, LTI)模型的加权响应相加得到整个模型响应。如图 5 为多面体模型示意图[29]。

非线性系统的一般表达式可以表示为

$$\dot{x} = f(x, u) = A(x, u)x + B(x, u)u \quad (7)$$

这个系统可以用一组线性局部模型来近似, 这些模型是在这些不同的局部条件下对系统的充分描述。局部模型的参数由非线性模型的线性化或系统辨识方法的实测数据得到。从一种操作状态到另一种操作状态的转换是通过加权函数 $\omega_i(u)$ 来完成的, 也称为调度函数[30]。多面体模型数学描述可以表示为

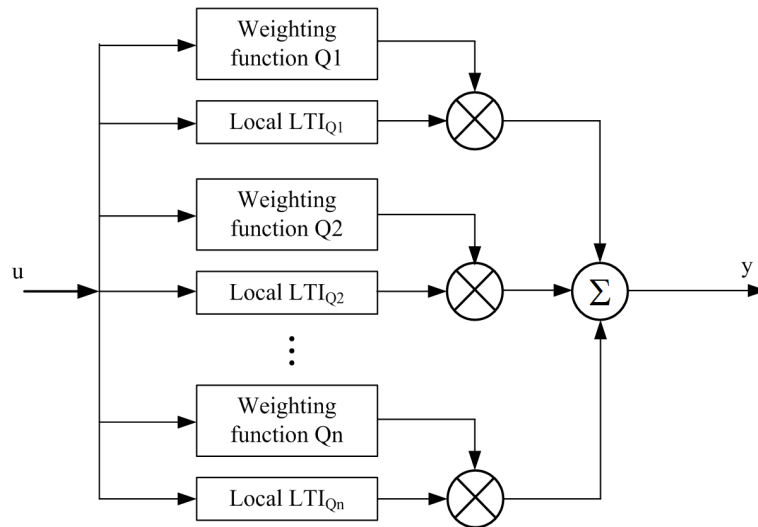


Figure 5. Polytopic model
图 5. 多面体模型

$$\begin{cases} \dot{x} = \sum_{i=1}^n \omega_i(u)(A_i x + B_i u) \\ y = \sum_{i=1}^n \omega_i(u)(C_i x + D_i u) \end{cases} \quad (8)$$

为了保持模型的完整性，加权函数必须满足以下条件

$$\sum_{i=1}^n \omega_i(u) = 1 \forall t \quad (9)$$

GP 方法对于静态系统非常方便，也就是说，系统主要在某个操作点上工作，它们的控制对扰动做出反应来维持这些条件。这种线性结构是大多数黑盒模型的基础。非线性可分为静态非线性和动态非线性。如果稳态响应中存在非线性，并且动态行为可以用线性模型近似，则可以使用 Wiener-Hammerstein 方法。这是一种基于块的方法，其中包括非线性静态函数设置转换器的静态工作点和线性动态块的瞬态行为。然而，智能微网系统包含一种混合的交直流配电体系结构，其中各种负载由不同类型的电源供电。因此，稳压变流器之间的相互作用、负载连接、保护的激活等，导致配电系统系统级复杂的大信号行为。大范围的操作条件和转换器可能改变控制策略的不同状态阻碍了这些小信号模型的使用。多面体模型能够再现这些现象，而且多面体模型可以在多个操作点稳定工作，不同转换器的模型之间的连接也很方便。

3. 智能微网的控制策略和稳定性分析

3.1. 微电网的控制策略

微电网是由一组分布式发电单元，储能装置，负载和相应的控制单元组成、可以稳定运行的新型发配电结构。其典型特征是它可以与外部电网连接实现并网运行或在离网模式下运行。因此，微电网的稳定运行就显得尤为重要。传统电网已经拥有相当成熟的控制策略和建模方法。对微电网来说，一个可靠、有效的控制策略和控制方法对其稳定运行有极其重要的意义。

3.1.1. 分布式电源的控制方法

微电网中的分布式电源按照并网方式不同可以分为逆变型电源、同步发电机型电源和异步发电机型电

源。微电网中大部分电源属于逆变型分布式电源,如光伏发电系统、燃料电池,微型燃气轮机等[31]。目前,从分布式电源控制方面可以把控制方法分为恒压恒频控制(U/f 控制)、恒功率控制(PQ 控制)、下垂控制(Droop 控制)[32]。下垂控制是现在运用比较广泛的一种控制方法,这种控制方法对微网中微源输出的有功功率和无功功率分别进行控制,无需机组间的通信协调,实现了微源即插即用和对等控制的目标,保证了微电网离网模式下电力平衡和频率的统一,具有简单可靠的特点[33]。虽然下垂控制不需要通信来实现初级电压的快速响应,但是电压会受到下垂项的影响[34]。文献[35]介绍了一种基于下垂法的直流微电网分散电压控制策略,所提出的分布式二次电压控制利用平均电压共享方案来补偿由下垂控制引起的电压偏差。

3.1.2. 微电网整体控制策略

微电网的每一种运行方式都需要对分布式发电单元进行精确、有效地控制,以维持电压和频率在稳定运行范围之内。在并网运行模式中,微电网的频率和 PCC 处的电压主要由主电网确定。在这种情况下,微电网控制的主要作用是容纳分布式发电单元产生的有功和无功功率以及负载需求。在离网运行模式下,各个分布式发电单元不再可以从主电网获得参考电压和频率,控制变得更加复杂,离网运行模式面临的挑战与困难高于并网模式[36]。微电网的整体控制策略可以分为主从控制、对等控制。主从控制策略主要用于离网运行的微电网,一般是以某个或多个分布式电源作为主电源来提供和监控电压、频率等参数,通过通信线来控制其它从属的电源。对等控制是针对即插即用式微电网提出的一种控制方法,在这种控制方式中,各个分布式电源没有主次之分。

随着技术的发展,文献[37]提出一种多代理系统(MAS, Multi-Agent System),MAS 是分布式人工智能的主要研究方向之一,研究人员将 MAS 的理念和技术与微电网结合,形成了基于多代理技术的微电网协调控制。微电网的分布式特性和灵活性使得传统的集中控制调度方法很难有效实现,而通过将部分控制权分散到局部控制装置,让其具有一定自主性与智能性,使得集中控制不必采用复杂的模型,从而避免大规模的运算。文献[38]介绍了一种基于代理的微电网能源市场的运作。主要关注通过其市场环境控制生产单元与代理商的相互信息交流;初步结果表明了这种方法的可行性。文献[39]提出并实现了基于因特网协议和基于 MAS 技术的微电网监控系统。当主电网遇到故障时, MAS 架构将微电网与主电网隔离,以确保微电网安全稳定运行,并在故障清除后使微电网与主电网并网运行。基于多代理技术的微电网协调控制利用代理的自治性、反应能力自发行为等诸多优点将复杂的整体控制转化为分散控制,提供了一个能够嵌入各种控制功能但又无需对系统各部分过多干预的智能系统。但目前对多代理技术的应用多集中于协调市场交易和对能源进行管理方面,还未深入到对微网的电压、频率等进行控制的层面。

3.2. 微电网的控制结构

关于微电网系统控制的架构,文献[40][41]提出了两种相反方法:集中式和分散式。完全集中控制依赖专用中央控制器中收集的数据,该控制器执行所需的计算并确定单个点上所有单元的控制动作,需要中央控制器与受控单元之间进行广泛通信。另一方面,在完全分散的控制中,每个单元由其本地控制器控制,该控制器仅接收本地信息并且不完全了解系统其他变量也不完全了解其他控制器的动作。标准化的过程和易于实现是集中式方法的优点之一。但是,在微电网中,每个分布式发电都有自己的控制器,并追求不同的目标,分布式控制提供了很好的适用性。随着微电网规模的增大,不同组件与微网控制器之间传输的信息数量也随之增加,因此需要更大的通信带宽。分散控制可以减少信息的数量,并且通过将其简化为子问题并在局部进行求解来简化带有特殊约束的优化。文献[42]提出了一种微电网中央控制器,它主要具有两个功能:与配电系统运营商和电力市场建立通信通道,并与微电网本地控制器交换信息并进行处理。在集中控制方案中,中央控制器根据目标函数和约束做出所有 DG 和能源存储系统的分派的决定。互联电力系统通常覆盖广阔的地理区域,由于广泛的通信和计算需求,实现完全集中的方法是不

可行的。同时，由于系统中各个单元操作之间的强耦合，也需要完全分散的方法，通过仅有的局部变量无法实现系统最低要求的协调[43]。文献[44]提出了一种单相柔性交流微电网中的分散式功率控制方法，使微电网逆变器能够在并网和离网运行模式下无缝切换。文献[45]进行了不同层级的微电网结构和控制技术的概述。文献[46]提出一种完全集中和完全分散控制方案之间折衷的控制架构，可以通过三个控制级别组成的分级控制方案来实现：初级，次级和第三级。

初级控制即为主控制，也称为本地控制或内部控制，是控制层次结构中的第一级，具有最快的响应。该控制仅基于本地测量，不需要通信。鉴于其速度要求和对本地测量的依赖，离网检测，输出控制和功率共享和平衡控制都包含在初级控制中。次级控制，也称作微电网能量管理系统，负责微电网在并网或者离网模式下安全、可靠、经济运行，并校正初级控制的一些偏差。第三级控制是最高层级控制，负责协调系统中多个相互作用微电网的运行，并协调来自自主电网的通信要求。文献[47]基于智能微网的灵活性，提出了即插即用式的控制方案；对于大电网，智能微网是一个即插即用的可控子系统；对于智能微网，不同的分布式发电单元又是一种即插即用的子模块，大大提高了整个系统的灵活性与可靠性。文献[48]在能源互联网中提出了由配电网调度层、微电网集中控制层和局部控制层组成的三层协同调度系统。基于三层协同调度体系结构，采用改进的分支电流前向法和遗传算法求解配电网运行损耗模型并完成配电网层的最优调度。

3.3. 智能微网稳定性分析

智能微网实现稳定可靠运行是微电网控制首要解决的问题。其稳定性是指系统在遭受到扰动以后恢复稳定运行的能力。微电网稳定性研究可以从系统受到的扰动性质大致分为小信号稳定性和大信号稳定性。在微电网运行时，负载投切变化，环境、天气因素使得新能源出力变化，功率波动，有源负载的接入等一系列的小范围扰动使得功率频繁变化，影响微电网的稳定运行。因此，保证微电网在各种扰动及运行模式下稳定运行，是微电网稳定运行的关键。目前，对微电网小信号稳定性的研究主要集中在基于逆变器的以离网模式运行微电网，电网小信号稳定性的分析方法应该能够对每一个单元的动态性能进行分析[49]。对于基于逆变器以及含有大量电力电子装置微电网，现有的分析方法主要包括使用状态空间模型的特征值分析法、基于阻抗模型的阻抗分析法、用于微电网小干扰模型降阶分析的奇异摄动法以及其他非线性分析方法等。与传统电力系统的分析方法类似，基于状态空间模型的特征值分析法，首先建立描述微电网系统的微分方程，然后在某一平衡点处线性化，得到微电网的小信号状态空间模型，最后根据状态矩阵特征根进行小扰动稳定性分析[50]。使用现代控制理论的技术，其中自治系统由状态空间形式中的一组微分代数方程描述

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (7)$$

利用泰勒级数展开法将方程线性化得到

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta u \quad (8)$$

特征值分析已被广泛用于分析控制系统的稳定性。稳定性判据可以通过状态矩阵的特征值分析来获得。当所有特征值的实部都是负数时，系统是稳定的。否则，当存在一个或多个具有正实部的特征值时，它将导致系统不稳定。此外，当参数变化时，我们可以通过相应特征根的根轨迹来分析对系统稳定性的影响。文献[51]使用虚拟阻抗对微电网进行了稳定性分析，提出了一种提高微电网稳定性的诊断算法。但是，其所提供的判据只能假设潮流单向的，限制了其使用在负荷侧存在分布式发电单元的场所。

特征值分析法是基于状态空间模型的，通过将工作点附近的非线性系统线性化，建立系统的状态空间模型，然后利用线性工具进行特征值和灵敏度分析，使用奈奎斯特或劳斯-赫维茨稳定性判据对线性

化的系统进行稳定性研究，其物理意义和原理简单明确，判据明确严格。然而，其方法的主要缺点是线性化点局部区域的有效性和大小，线性化是否是准确的，有限的，并且在很大程度上未知的。而且，对于高阶复杂系统，状态空间表达式难以建立。微网设备的投切变化频繁使得参数变化也较为频繁，其状态空间模型均需要改变，这些因素加大了特征值分析法的难度。而阻抗分析法无需知道各子系统的内部参数，仅通过源与负荷之间阻抗匹配关系即可判断系统的稳定性。因此，它非常适合微网这一复杂系统的小扰动稳定性分析。由于微网是一个复杂动态系统，其方程模型存在非线性动态关系，而且，当微网系统在遭受发电机组损失、负荷变化大、线路故障等较大扰动时，导致配电系统系统级复杂的大信号行为，阻碍了这些小信号模型的使用。基于李亚普诺夫的稳定性分析方法的主要优点在于，李亚普诺夫函数允许对稳定运行点的吸引域进行估计，从而提供稳定域的保守估计。另一方面，大信号非线性稳定性研究采用李雅普诺夫方法，可以使用不经过线性化的非线性数学模型。大大提高了分析的准确性。大信号非线性稳定性分析的有效性和有效性的范围远远大于小信号线性分析。

微电网中的小信号稳定性与反馈控制器，连续负载切换，微源功率限制等有关。微电网的暂态稳定性可以通过一个非线性模型进行分析[52]。大信号非线性稳定性研究采用非线性数学模型，无需线性化，可以使用基于李亚普诺夫的数学方法来完成[53]。微电网模型用于与变换器接口的电源进行暂态稳定性分析，微电网的李雅普诺夫特性可以从下垂控制器变量中选择，即变换器工作频率和滤波电容器电压[54]。其函数可以写成

$$f(x) = f(\omega_1, \omega_2, V_{cfdq1}, V_{cfdq2}) \quad (9)$$

其中， ω 是变换器的工作频率， V_{cfdq} 是滤波电容器的电压。总之，系统通过大信号稳定性分析是稳定的，则系统在小信号稳定性分析中也是稳定的，但相反的情况不一定成立[55]。此外，微电网可以由各种发电机和负荷单元组成。每个系统都具有不同的时间尺度，在不同的控制技术和非线性状态下运行。所以，微电网本质上是非线性系统，因此，必须使用非线性稳定性分析来提高精度[56]。文献[57]基于混合电势理论研究了交流微电网大信号稳定性，并考虑了存储系统和恒定功率负载的影响。

4. 总结与展望

利用不同类型可再生能源的分布式发电单元的接入、不同类型负荷的随机投切、系统中各个设备间的相互作用、元件不同的电气和物理特性以及网络通讯可能诱发的一系列问题时刻影响着智能微网的稳定运行。本文对现有智能微网的发展现状进行了描述，并对其结构和控制策略进行了介绍。在对智能微网的运行特性描述的基础上，进一步对微网模型建立方法和稳定性进行了阐述。最后，讨论了智能微网在实现过程中遇到的建模问题和控制问题并梳理出了几个具有一定参考价值的未来研究方向。

1、在前述的建模问题中，无论是通过机理建模还是使用当下热门技术的人工神经网络建模，其很少有考虑在随机大扰动情况下模型的建立和稳定性分析[58]。微电网系统总规模较小，系统存储容量也不是很大，具有很大随机性的风光等可再生资源即是微电网发电的主要来源，也是一种随机扰动；负载等的接入也具有一定的随机性，这些随机性的变化对于微电网来说都存在大幅度的影响。所以必须在建模时充分考虑随机大扰动对微电网系统的影响。此外，由于微电源接口类型、微电网类型、运行方式、控制策略、网络参数等具有多种形式，微电网稳定运行特性也会随之改变[59]。因此，微电网的建模要具有总体性，对于主电网，微电网是一个可控的子系统，人们所关注的是微电网的总体特性，即不需要对微电网中各个单元进行详细建模，避免了大量的计算问题和维数问题。由于微电网的灵活性和拓扑结构的复杂多变，对于每一个具体的微电网系统建立模型并对稳定性进行分析，确定其合适的控制方案，这样成本是相当高昂的，并不利于微电网的推广与发展。应当建立一套具有广泛适应性的模型建立方法。

2、信息物理系统是当下的研究热点之一。智能微网融合了先进的电力技术、计算机技术、数据采集技术、通信技术和控制技术，是一种典型的信息物理系统。在现代物联网视角下，微电网互联组成一个具有能量管理调配，信息实时互通；解决数量庞大、形式多样的分布式电源并网问题的小型局域智能微电网系统，实现微电网集群控制是未来智能微网的一大趋势。在前述微电网控制架构中，微电网内部采用分层次控制结构，微电网与主电网，微电网与微电网之间的通讯和控制采用中央处理器与局域中央处理器协作完成，这势必会产生多通讯延迟。考虑多通讯延迟以及网络信息传输中的丢包，不确定将成为智能微网集群控制亟待解决的问题。

3、智能微网具有供配电方式灵活、可靠等优点，这些优点的实现离不开与系统相适应的，稳定而完善的控制系统。此外，智能微网涌现出一些新的电力电子设备，微源数量和类型不断增加，对于智能微网的稳定控制提出了不小的挑战。因此，智能微网的控制系统必须保证任何微电源的接入或退出运行不能对总体系统造成影响；可以平滑地与主电网进行并网、离网操作，并可以自主选择平稳运行点；具有校正电压突然跌落和系统不平衡的能力。而未来智能微网的控制系统应当更加强大[60]：

1) 实现配电网优化运行：载荷分布实时监测、分析和优化的分销网络，为扩大电源和负载能力，通过分散的无功功率和电压调节资源来提高电源电压的质量；

2) 实现相关系统集成：采用标准化接口方式，实现与调度自动化系统、生产管理系统、营销管理系统的互联互通，提高配电自动化系统的智能化运行管理水平；

3) 无缝接入分布式电源：安全无缝接入各类发电和储能接入系统，包括光伏发电、风电、小型燃气轮机和先进电池系统，实现“即插即用”；

4) 实现用户交互技术：通过与电力营销系统的结合，与用户建立双向实时沟通。通知用户的实时电价和电网的现状和其他服务信息，并且还支持用户按照信息开发自己的用电计划，以便允许用户参与电力系统的运行和管理。

参考文献

- [1] Irfan, M., Iqbal, J., Iqbal, A., *et al.* (2017) Opportunities and Challenges in Control of Smart Grids-Pakistani Perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **71**, 652-674. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.095>
- [2] Shahidehpour, M. (2010) Role of Smart Microgrid in a Perfect Power System. *EEE PES General Meeting*, Providence, RI, 25-29 July 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590068>
- [3] McIntyre, K.C., Clancey-Rivera, C., Tobin, M.C., *et al.* (2010) The Feasibility of an Environmentally Friendly Microgrid. *North American Power Symposium 2010*, 26-28 September 2010, Arlington, TX, 1-6. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2010.5619973>
- [4] 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): 83-87.
- [5] Verma, V., Solanki, S.K. and Solanki, J. (2017) State Space Modeling of Three-Phase Transformers for Small-Signal Analysis of a Microgrid. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, 17-19 September 2017, Morgantown, WV, 1-4. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107337>
- [6] 黄国维, 邓伟锋, 朱智成. 风光储微电网系统建模仿真[J]. *自动化与仪表*, 2018, 33(9): 85-91.
- [7] Naderi, M., Khayat, Y., Shafiee, Q. and Bevrani, H. (2018) Modeling of Islanded Microgrids Using Static and Dynamic Equivalent Thevenin Circuits. *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, Riga, 13-15 February 2018, 1-10. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2018.8343849>
- [8] Valdivia, V., Diaz, D., Gonzalez-Espin, F., *et al.* (2014) Systematic Small Signal Modeling and Stability Analysis of a Microgrid. *2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Galway, 24-27 June 2014, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2014.6878648>
- [9] Moussa, H., Martin, J., Pierfederici, S., *et al.* (2017) Modeling and Large Signal Stability Analysis for Islanded AC-Microgrids. *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati, OH, 1-5 October 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101758>
- [10] Pogaku, N., Prodanovic, M. and Green, T.C. (2007) Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an

- Inverter-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22**, 613-625. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.890003>
- [11] Katiraei, F., Iravani, M.R. and Lehn, P.W. (2007) Small-Signal Dynamic Model of a Micro-Grid Including Conventional and Electronically Interfaced Distributed Resources. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **1**, 369-378. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20045207>
- [12] Guarderas, G., Francés, A., Asensi, R., *et al.* (2017) Large-Signal Black-Box Behavioral Modeling of Grid-Supporting Power Converters in AC Microgrids. 2017 *IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, San Diego, 153-158. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191258>
- [13] Liu, H., Cai, C., Tao, Y., *et al.* (2018) Dynamic Equivalent Modeling for Microgrids Based on LSTM Recurrent Neural Network. 2018 *Chinese Automation Congress (CAC)*, 30 November-2 December 2018, Xi'an, China, 4020-4024. <https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623202>
- [14] 王成山, 王守相. 智能微网在分布式能源接入中的作用与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 232-240.
- [15] Kumar, H.R. and Ushakumari, S. (2016) A Novel Architecture for Data Management and Control in Autonomous Intelligent Microgrid. *Procedia Computer Science*, **89**, 412-421. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.06.089>
- [16] Schiffer, J., Zonetti, D., Ortega, R., *et al.* (2016) A Survey on Modeling of Microgrids—From Fundamental Physics to Phasors and Voltage Sources. *Automatica*, **74**, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.07.036>
- [17] Lasseter, R.H. (2002) MicroGrids. 2002 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, 305-308.
- [18] Liu, M., Li, L., Ye, H. and Liu, X. (2016) Effectiveness Analysis of the Average Value Modeling of Microgrid. 2016 *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Xi'an, 10-13 August 2016. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576253>
- [19] Biolkova, V., Kolka, Z. and Biolek, D. (2010) State-Space Averaging (SSA) Revisited: On the Accuracy of SSA-Based Line-to-Output Frequency Responses of Switched DC-DC Converters. *WSEAS Transactions on Circuits & Systems*, **9**.
- [20] Dong, L., Ma, H. and Xu, F. (2008) Modeling and Analysis of PWM Converters with a New GSSA Method. 2008 *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 3 April 2008.
- [21] Che Y., Xu J., Yang Y., Zhou, J. and Zhao, Y.C. (2018) Large Signal Modeling Method for AC/DC Independent Power System in DQ-Coordinates. *IEEE Access*, **6**, 32207-32215. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834538>
- [22] Wu, X., Zhao, X., Kang, Z., Li, W.L. and Wu, X.H. (2019) Small-Signal Discrete-Time Modeling and Stability Analysis of Digital-Controlled DC-AC Converter with Symmetric PWM. 2019 *IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Edinburgh, Scotland, 16-19 July 2019. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2019.8899910>
- [23] Maksimovic, D. and Zane, R. (2007) Small-Signal Discrete-Time Modeling of Digitally Controlled PWM Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22**, 2254-2256. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.909776>
- [24] Wu, X., Xiao, G. and Lei, B. (2013) Simplified Discrete-Time Modeling for Convenient Stability Prediction and Digital Control Design. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 5333-5342. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2245514>
- [25] Shang, J., Li, H., You, X., Zheng, T.Q. and Wang, S. (2015) A Novel Stability Analysis Approach Based on Describing Function Method Using for DC-DC Converters. 2015 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte, NC, 15-19 March 2015, 2642-2647. <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104724>
- [26] Arnedo, L., Burgos, R., Boroyevich, D. and Wang, F. (2009) System-Level Black-Box Dc-to-Dc Converter Models. 2009 *Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington DC, 15-19 February 2009. <https://doi.org/10.1109/APEC.2009.4802861>
- [27] Guarderas, G., Frances, A., Ramirez, D., Asensi, R. and Uceda, J. (2019) Blackbox Large-Signal Modeling of Grid Connected DC-AC Electronic Power Converters. *Energies*, **12**, 989. <https://doi.org/10.3390/en12060989>
- [28] Francés, A., Asensi, R. and Uceda, J. (2019) Blackbox Polytopic Model with Dynamic Weighting Functions for DC-DC Converters. *IEEE Access*, **7**, 160263-160273. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950983>
- [29] Valdivia, V., Lazaro, A., Barrado, A., *et al.* (2012) Black-Box Modeling of Three-Phase Voltage Source Inverters for System-Level Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 3648-3662. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2167730>
- [30] Arnedo, L., Boroyevich, D., Burgos, R., *et al.* (2008) Year Polytopic Black-Box Modeling of DC-DC Converters. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, June 15-19 2008.
- [31] Jadhav, G.N. and Changan, D.D. (2016) Modelling of Inverter for Stability Analysis of Microgrid. 2016 *IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, Bikaner, 1-6. <https://doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077249>
- [32] Jadav, K.A., Karkar, H.M. and Trivedi, I.N. (2017) A Review of Microgrid Architectures and Control Strategy. *Journal of the Institution of Engineers*, **98**, 591-598.

- [33] Azim, M.I., Hossain, M.J., Griffith, F.H.M.R., *et al.* (2015) An Improved Droop Control Scheme for Islanded Microgrids. 2015 *5th Australian Control Conference (AUCC)*, Gold Coast, 5-6 November 2015, 225-229.
- [34] Nutkani, I.U., Peng, W., Chiang, L.P., *et al.* (2015) Secondary Droop for Frequency and Voltage Restoration in Microgrids. 2015 *17th European Conference on Power Electronics and Applications*, Geneva, 1-7. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309457>
- [35] Banadaki, A.D., Mohammadi, F.D. and Feliachi, A. (2017) State Space Modeling of Inverter Based Microgrids Considering Distributed Secondary Voltage Control. 2017 *North American Power Symposium (NAPS)*, Morgantown, WV, 1-6.
- [36] Narkhede, M.S., Chatterji, S. and Ghosh, S. (2012) Trends and Challenges in Optimization Techniques for Operation and Control of Microgrid: A Review. 2012 *1st International Conference on Power and Energy in NERIST (ICPEN)*, Nirjuli.
- [37] Dimeas, A. and Hatziaargyriou, N. (2004) A Multi-Agent System for Microgrids. In: *Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, Springer, Berlin, 447-455. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24674-9_47
- [38] Colson, C.M. and Nehrir, M.H. (2011) Algorithms for Distributed Decision-Making for Multi-Agent Microgrid Power Management. 2011 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039764>
- [39] Li, T., Xiao, Z., Huang, M., *et al.* (2010) Control System Simulation of Microgrid Based on IP and Multi-Agent. 2010 *International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA)*, Kunming, V1-235-V1-239.
- [40] Palizban, O. and Kauhaniemi, K. (2015) Hierarchical Control Structure in Microgrids with Distributed Generation: Island and Grid-Connected Mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **44**, 797-813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.008>
- [41] Guerrero, J.M., Chandorkar, M., Lee, T. and Loh, P.C. (2013) Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **60**, 1254-1262. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194969>
- [42] Su, W. and Wang, J. (2012) Energy Management Systems in Microgrid Operations. *The Electricity Journal*, **25**, 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.010>
- [43] Kim, J., Guerrero, J.M., Rodriguez, P., *et al.* (2011) Mode Adaptive Droop Control with Virtual Output Impedances for an Inverter Based Flexible AC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **26**, 689-701. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2091685>
- [44] Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F. and Rodríguez, P. (2012) Control of Power Converters in AC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 4734-4749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334>
- [45] Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H., *et al.* (2014) Trends in Microgrid Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **5**, 1905-1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- [46] Vandoorn, T., Zwaenepoel, B., Kooning, J., *et al.* (2011) Smart Microgrids and Virtual Power Plants in a Hierarchical Control Structure. *2nd European Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT-Europe 2011)*, Manchester, 5-7 December 2011. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2011.6162830>
- [47] Rivero, S., Sarzo, F. and Ferrari-Trecate, G. (2015) Plug-and-Play Voltage and Frequency Control of Islanded Microgrids with Meshed Topology. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **6**, 1176-1184. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2381093>
- [48] Zhao, F., Li, N., Yin, Z. and Tang, X. (2014) Small-Signal Modeling and Stability Analysis of DC Microgrid with Multiple Type of Loads. 2014 *International Conference on Power System Technology*, Chengdu, 20-22 October 2014, 3309-3315. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2014.6993873>
- [49] Hadavi, S., Sanjari, M.J., Yatim, A.H. and Gharehpetian, G.B. (2014) Small Signal Stability Assessment of Islanded VSI-Based Microgrids Considering Load Variations. 2014 *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, Johor Bahru, 13-14 October 2014, 440-444. <https://doi.org/10.1109/CENCON.2014.6967544>
- [50] Wang, S., Su, J., Yang, X., *et al.* (2016) A Review on the Small Signal Stability of Microgrid. 2016 *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016-ECCE Asia)*, Hefei, 22-26 May 2016, 1793-1798. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512566>
- [51] Sathesh Kumar, G.S., Nagarajan, C. and Selvi, S.T. (2018) A Virtual Impedance Based Analysis of Dynamic Stability in a Micro-Grid System. 2018 *Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, Tiruchengode, 38-41. <https://doi.org/10.1109/ICEDSS.2018.8544374>
- [52] Andrade F., Kampouropoulos K., Romeral L., *et al.* (2014) Study of Large-Signal Stability of an Inverter-Based Generator Using a Lyapunov function. *IECON 2014 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, 29 October-1 November 2014, 1840-1846. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048752>

-
- [53] Kabalan, M., Singh, P. and Niebur, D. (2017) Large Signal Lyapunov-Based Stability Studies in Microgrids: A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **8**, 2287-2295. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2521652>
- [54] Majumder, R. (2013) Some Aspects of Stability in Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 3243-3252. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2234146>
- [55] Du, W., Zhang, J., Zhang, Y. and Qian, Z. (2013) Stability Criterion for Cascaded System with Constant Power Load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 1843-1851. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2211619>
- [56] Topcu, U. and Packard, A. (2009) Linearized Analysis versus Optimization Based Nonlinear Analysis for Nonlinear Systems. *2009 American Control Conference (ACC)*, St. Louis, MO, 10-12 June 2009, 790-795. <https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5160528>
- [57] Liu, X., Gao, Z. and Bian, Y. (2018) Large Signal Stability Analysis of AC Microgrids Considering the Storage System. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Jeju, 7-10 October 2018, 2023-2027. <https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549445>
- [58] 杨苹, 陈敬峰, 彭嘉俊, 等. 微电网系统建模的挑战——“智能微电网与可再生能源系统的关键技术”专题(前言)[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(8): 1046-1052.
- [59] 赵卓立, 杨苹, 许志荣, 等. 多源多变换微电网大扰动暂态稳定性研究综述[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2195-2204.
- [60] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. *电网技术*, 2009, 33(13): 1-11.