

直流微网 Simulink 变流器模型 及其计算机应用仿真研究

王树东^{1,2}, 李晓晓^{1,2}

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 新的电能系统设计时应多利用可再生能源, 以减小对环境的污染。针对这样的设计初衷, 分布式发电和微网应运而生。然而, 由于可再生能源的强随机特性, 微网系统的设计优化变得难以实现, 仿真方法便成了优化解决方案的最佳选择。微网系统包含多种设备, 其中最重要的是变流器。用于变流器仿真的工具主要有 PSpice、PSIM, 而对于直流微网网络, 这种仿真工具的仿真算法较慢, 且不能建立直流微网模型。针对这一问题, 设计一种半桥变流器模型对直流微网潮流和静态电压进行仿真实验, 并将实验结果与 PSIM 的模型进行对比, 结果显示, 这种模型建立简单, 仿真速度快, 具有较强的实用性。

关键词: 电力系统仿真; 直流微网; 分布式发电; 电力电子变换

中图分类号: TP393.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-0682(2014)06-0113-05

DC microgrid converters model and its Simulation research in computer application

WANG Shudong^{1,2}, LI Xiaoxiao^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology;

2. Key Laboratory of Advanced Control for Industrial Processes in Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The new electric energy system design should be use more renewable energy, reduce the pollution to the environment. For the design of the purpose, distributed generation and microgrid appears. However, due to the strong random characteristics of renewable energy, for a small grid system, its design optimization has become difficult to achieve, so the simulation method became the most optimal method for optimization. A microgrid system contains a variety of equipment, one of the most important, is the electronic converters. Generally, tools for the simulation of the electronic converters is the PSpice and the PSIM, for DC microgrid, first, the simulation algorithm of simulation tools is too slow, secondly it is not allowed to establish DC microgrid model. This paper use half bridge converter model to simulation under the structure of micro power flow and static voltage behavior, and compared with PSIM model, according to the results, the model is simple to establish, and with faster simulation speed, it has strong practicability.

Key words: simulation of power system; DC microgrid; distributed generation; power electronic converters

0 引言

为了使电能能够灵活配送, 便提出了分布式发电的概念, 其系统一般基于可再生能源, 比如太阳能、风力和水力发电等。但是分布式发电并网存在

着比较突出的问题^[1]。首先是电能质量的控制, 分布式发电一般连接低电压网络, 存在电压调整和电压稳定的问题; 其次就是发电系统成规模建设成本也不容小觑。

直流微网作为一种新的电能形式, 很有希望成为解决上述问题的一种方法, 但是, 若要将直流微网用来优化电能的产生和输送, 则需要考虑以下几个关键问题^[2]: 1) 发电厂容量设计; 2) 控制策略; 3) 电

收稿日期: 2014-02-24

作者简介: 王树东(1965) 男, 山东青岛人, 教授, 主要从事计算机自动控制技术、智能检测技术的教学与应用研究工作。

能输送优化; 4) 储能系统容量设计。

考虑这些问题都是由于可再生能源的随机性, 其发出的电能很难预测和控制, 所以需要通过仿真来进行设计优化, 以减小系统的设计成本。其中, 作为整个微网运行的核心组件, 变流器的建模显得尤为重要, 该文提出了一种有效的变流器模型建立方法。

1 直流微网的概念

直流微网可以看作一个完整的小型电力系统, 它包含了常规电力系统所有的子系统: 发电厂、储能系统、配电网、变压器、控制系统、负载。

微网可同时工作于并网和脱网两个状态, 微网中的所有设备的控制目标都是为了保证发电和负载之间的功率平衡。一般而言, 微网网络只有一个较低的电压等级, 其电压的稳定性只受能源和储能系统影响。图 1 为直流微网的基本构成框图。

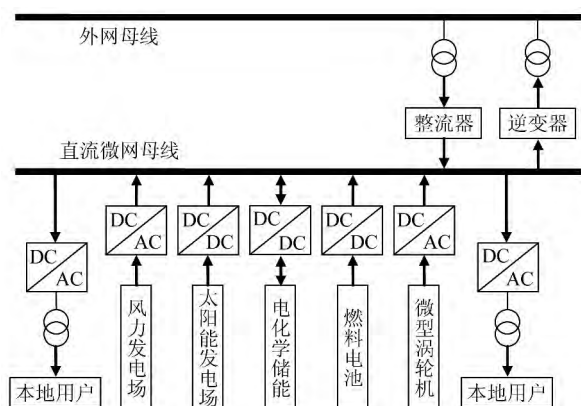


图 1 直流微网结构简图

该文主要研究电能的产生和控制, 也就是变流器的控制优化。可再生能源发电厂的能源一般来自风能、太阳能、燃料电池等。储能系统同样部署在微网系统中, 用以平抑功率波动, 微网的最小系统原理框图如图 2 所示^[3]。



图 2 直流微网最小系统

2 微网中的变流器

电源是微网设计中需要重点控制的部分, 其主要有以下几类^[4]:

- 1) 直流源。光伏电池、燃料电池;
- 2) 频率可变的交流源。汽轮机、发电机;

3) 恒频率交流源。汽轮机、发电机。

电源的输出特性完全由变流器决定, 加之微网本身包含数量众多的变流器(见图 1 和图 2), 所以变流器是微网中最重要的组成部分, 它主要完成电压控制、潮流控制、系统平衡、故障保护、功率源最大功率追踪等。

尽管系统中可以部署几乎所知的所有电力电子设备, 以直流系统为例, 其最重要的变流器组便是直流-直流变流器, 千瓦级的直流-直流变流器基本上有如下几种: Buck 变流器、Boost 变流器、半桥变流器、桥式变流器。

以半桥式变流器为例, 包括网侧变换器, 辅助构成组件还包括输入滤波器、高频逆变器、高频变压器、高频整流器、输出滤波器。

半桥变流器的结构如图 3 所示。

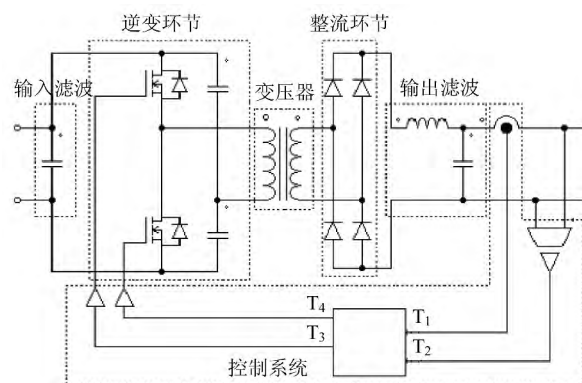


图 3 半桥变流器结构框图

3 微网建模

如何有效经济地运行微网系统, 是设计微网最重要的目标, 然而现在的辅助设计工具并不可以同时设计并且优化复杂的微网系统, 更别说精确到其每一个组件了。所以需要研究微网具体的建模方法, 在等效的理想化之后, 应尽量减少仿真系统未知量的个数。

在设计之初, 需要先了解以下参数及特性: 发电厂产能、潮流及其平衡、储能系统特征、电压稳定性、电压暂态特性。

一般而言, 需要有 3 个时间周期来研究以上这些参数及特性。

年级别周期: 电能的产生和平衡;

日时分级别周期: 电压静态特性和稳定性、储能系统特性;

毫秒级别周期: 电压暂态特性和系统故障。

因此, 针对上述 3 个时间周期下系统的仿真, 需

要开发 3 套不同的仿真方法。可将微网的设备分为 3 组^[5]: 微网网络、发电厂和储能设备、电力电子设备。

通过观察一年的能量供需变化,可以发现它们呈周期变化,而一年也是确定规律周期所需最短的时间。系统仿真最重要的部分是潮流的仿真,因为它不仅可以优化电能的产生,同时也可以优化电厂和储能系统的容量,这样便可以全面地掌控能量的消耗。因为具有很强的随机性,太阳能、风能以及电能需求也是仿真的难点,系统仿真时间一般设在 10 s ~ 10 min 之间,微网的建模遵循功率平衡方程:

$$\Delta p(t) = \sum p_p(t) - \sum p_l(t) - \sum p_s(t) \quad (1)$$

其中: $p_p(t)$ 为发电厂功率; $p_l(t)$ 为负载功率; $p_s(t)$ 为储能系统功率(储能系统荷电状态时为负)。

为了研究静态电压特性,需要加长仿真周期,一般在 2 ~ 3 d,这样可以研究在多种输入同时快速的作用下微网网络、发电厂以及储能设备的运行特征。仿真步长为毫秒至秒级,在仿真中常用到网络的导纳模型。

$$I = UY \quad (2)$$

其中: I 为电流向量; U 为电压向量; Y 为系统导纳矩阵。

研究电压动态变化特性是为了避免突然的电压跌落和功率短缺造成的并网失败,所以微网组件的动态特性是相当重要的。一般而言,仿真时间从几秒到十几秒不等,仿真步长为毫秒级。

4 变流器建模

电压质量的研究以及微网特性的研究实质上是基于变流器的研究,所以对于整个微网的仿真研究,变流器建模显得尤为重要,现在最流行的变流器仿真工具有 PSIM 和 Tcad,然而这两种工具是用来对变流器进行建模和仿真的,而这里仿真的目的是对变流器之间的相互影响进行研究,这种相互影响的系统建模比较复杂,仿真的时间通常低于 1 s,仿真步长大约为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ s。如要仿真一天、一周、甚至一年的运行状况,利用这两种仿真工具几乎是不可能实现的。

假设应用了已知特性的变流器模型,微网的仿真设计中不需要考虑变流器模型对整体系统的影响,这时变流器的内部状态参数可以被简化或忽略。但是以变流器外部特性为主的仿真模型则必须用其他的仿真工具和仿真方法。

Matlab/Simulink 是一种常用的动态模型仿真工

具^[6]。针对上文提到的不同时间周期下对仿真系统的要求,以半桥变流器为例详述采用 Simulink 的仿真方法。

4.1 变流器潮流模型

在对变流器潮流模型建模前作了如下假设: 电厂处在最优化运行状态(比如最大功率追踪运行模式); 忽略网损; 变流器完全按照其设计指标正常运行。

简单来说,微网在电力系统中的作用就是根据电力供需要求,在功率变化时优化网络结构使功率平衡。其中变流器潮流模型的建模,仅考虑其功率损耗。而在一般负载特性下,千瓦级变流器的效率基本是一致的。因此按照图 4 对其进行建模。输出的功率可由式(3)计算得到:

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta \left(\frac{P_{in}}{P_N} \right) \quad (3)$$

其中: P_N 为变流器标称功率。

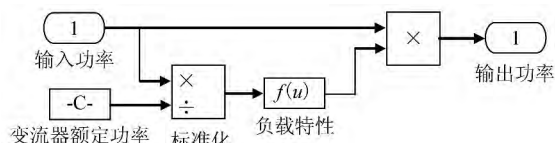


图4 变流器潮流模型

模型相当的简洁,而且该模型在长周期的仿真中具有很快的速度。通过调整模型参数,其模型效率特性可以进行灵活地更改^[7-8]。

4.2 变流器静态模型

变流器静态模型是用来仿真微网电压特性的。电压的变化主要由太阳能辐射不均、风速变化以及能量需求波动导致。而这种波动在秒级的范围内变化相对比较慢,从变流器的响应特性来看,可将其看做常值。

建模中应至少考虑以下假设: 波动变化足够的慢,慢于变流器滤波时间常数; 变流器输出电压很稳定,波动小于额定电压 1%; 忽略脉动电压、脉动电流。

这样,变流器内部状态可以看做是稳定的、不变的,其电流电压变化完全由调整机构的动作引起。忽略变流器本身的能量损耗,则变流器可以看做一个电压增益。

$$V_{out} = k \cdot V_{in} \quad (4)$$

$$I_{in} = k \cdot I_{out}$$

假设半桥变流器的耦合系数 k 为:

$$k = D \frac{z_2}{z_1} \quad (5)$$

其中: z_2/z_1 为变压器变比; D 为脉冲宽度。

综上所述,建立的半桥变流器静态模型如图 5 所示。

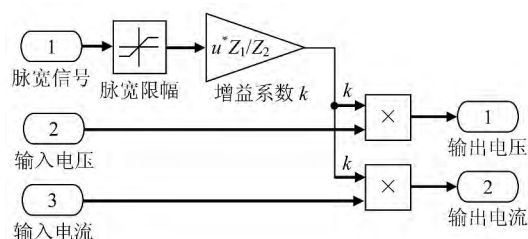


图 5 半桥变流器静态模型

变流器控制器是按照并行电压电流调节器进行建模的,其中用到了简单的 PI 调节器。其建模见式 (6)、式 (7) 和图 6。

$$D = \min(D_V, D_I) \quad (6)$$

其中: D_V 为输出电压调节信号; D_I 为输出电流调节信号。

$$D_V = (V_{\text{ref}} - V_{\text{out}}) K_{PIU}$$

$$D_I = (I_{\text{ref}} - I_{\text{out}}) K_{PII} \quad (7)$$

$$K_{PII} = k_{pi} \left(1 + \frac{1}{sT_{ix}} \right)$$

其中: T_i 为调节器时间常数; k_{pi} 为调节器增益; V_{ref} 为电压参考值; V_{out} 为电压测量值; I_{ref} 为电流参考值; I_{out} 为电流测量值。

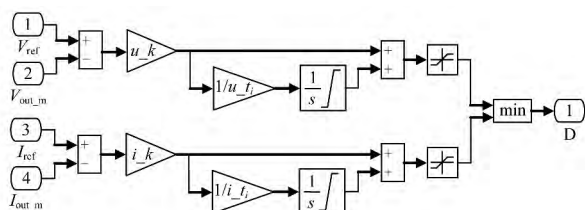


图 6 调节机构模型

5 仿真结果

验证模型实际仿真效果,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

输入滤波电容	470 μF
分压器电容	940 μF
输出滤波电抗	0.1 mH
输出滤波电容	470 μF
负载电阻	10 $\Omega/2 \Omega$
输入电压	100 V
电压调节器增益	1
电压调节器积分时间常数	0.001
电流调节器增益	10
电流调节器积分时间常数	0.001

首先在 PSIM 环境下进行仿真,其结果见图 7。

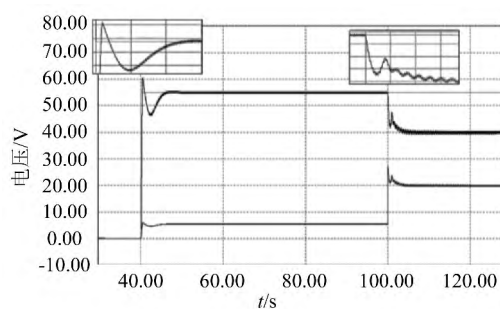


图 7 PSIM 环境下半桥变流器仿真结果

接着在 Simulink 环境下对静态模型进行仿真,结果与 PSIM 环境下模型进行对比,如图 8、图 9 所示。从对比仿真结果可以看到,Simulink 环境中简化的静态模型并不能精确地反映变流器动态特性,但因为该模型体现的是复杂系统建模仿真下的速度优势,所以个体变流器动态响应性能就显得不是很重要。尽管如此,对于静态电压以及其响应速度来说,该模型还是非常精确的。

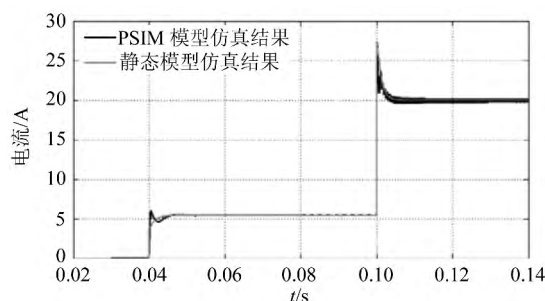


图 8 仿真电流对比

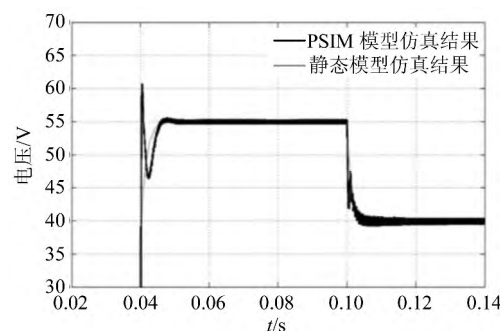


图 9 仿真电压对比

6 结语

该文提出了一种针对变流器暂态特性建模仿真的方法,同时对比在不同的仿真环境中模型运行的效果,如仿真结果所示,虽然其暂态特性并不能在仿真结果中得到充分体现,但是这并不是该模型的主要优势所在。该文模型的最大优势在于其仿真速度,为了适应并且模拟日益复杂的电力系统,比如像

包含了多个电力电子设备的直流微网系统,使用该模型,半桥变流器的仿真花费了不到 1 s 的时间,而相同的变流器仿真在 PSIM 环境中耗费了将近 30 s 时间。此模型可以快速模拟变流器的暂态特性,所以利用仿真方法设计复杂的电力系统时,该模型是一种有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 宋亦旭. 风力发电机的原理与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 38-48.
- [2] 廖明夫, R Gasch, J Twele. 风力发电技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 278-290.
- [3] 于群, 曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 124-137.
- [4] Biczal P. Power electronics converters in hybrid generating systems [J]. Energoelektronika w Nauce i Dydak - tycestr 2006, 10(2): 186-194.
- [5] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 北京: 中国电机工程学报, 2012(32): 2.
- [6] 林园园. 微电网并网换流器和直流微网控制的研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2011.
- [7] Karlsson P. DC Distributed Power Systems Analysis, Design and Control for a Renewable Energy System [D]. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden 2002.
- [8] Middlebrook R D. Modeling of Power Converters [J]. Proceedings of The IEEE, 1988, 76(4): 23-31.
- [9] 瞿津川. 微网运行仿真研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2010.

中国通用机械工业协会能量回收装备分会一届三次理事(扩大)会暨中国能量回收技术与装备论坛 2014 年会在上海召开

2014 年 10 月 15-16 日,中国通用机械工业协会能量回收装备分会(以下简称“能量分会”)一届三次理事(扩大)会暨中国能量回收技术与装备论坛 2014 年会在上海艾福敦酒店举行。

10 月 15 日晚,能量分会一届三次理事(扩大)会召开。会议由中通协副理事长、能量分会理事长印建安主持。姜国栋秘书长受理事长委托做了分会工作报告,总结回顾了能量回收装备分会一年来开展的主要工作。过去的一年,能量分会主动参与国家能源规划研究课题申报和《重大技术装备进口税收政策》等的制修订工作,搭建会员与政府之间的沟通桥梁;利用专业优势对行业发展态势进行分析,组织会员单位进行新技术市场调研,并筹备组建工业余能高效回收利用产业技术创新战略联盟,发挥市场化运作机制的作用,为会员单位提供服务。未来,能量分会将从为会员单位新产品开发搭建合作平台,提升为政府和会员服务的能力,加强与国际余能回收利用的组织和企业的联系与合作等方面持续开展工作。印理事长对分会工作提出了要求及今后工作的目标,并指出能量分会是市场化组织,是最具有生命力的,要执着地把分会的工作做好。

10 月 16 日,由中通协能量回收装备分会主办,陕西鼓风机(集团)有限公司协办的中国能量回收技术与装备论坛 2014 年会召开。能量分会的会员、行业专家、客户企业等共 72 家单位,120 多人参加了论坛。中国通用机械工业协会钱家祥副秘书长代表中通协对大会的召开表示祝贺,并对机械工业的经济形势作了报告。

有 12 位专家在论坛上作了主题演讲。中国炼焦协会崔丕江会长、中国钢铁协会市场部王颖生主任、中国石化工程建设有限公司冀江副总工程师等专家分别针对钢铁、焦化、石油化工等行业的发展情况、余能回收利用技术与装备现状、市场发展研究等方面进行了演讲交流;宝钢集团、陕西延长石油集团等分别介绍了各自的能量回收利用系统技术和装备的应用经验;陕鼓动力、中国长江动力集团、中石油兰州炼油机械厂、普惠动力系统等企业分别介绍了各自企业余能回收利用的系统解决方案。本次论坛搭建了行业协会、客户、解决方案提供商面对面的交流平台,使参会代表了解行业态势和客户需求,挖掘并整理资源,从而有针对性地优化余能回收利用的系统解决方案有积极意义。

印建安理事长在总结讲话中指出,今后协会论坛的内容应向多元化方向发展,要逐步深入研讨技术与产品、市场与商业模式、工业与金融服务等诸多方面,要以组建小组的形式将关联单位对接起来,联合攻关,探索如何提升系统解决方案的能力;分会的成员企业要抱团发展,在产业上互为资源,形成互补,相互支持,共同提升。