



智能变电站

系统仿真与建模

ZHINENG BIANDIANZHAN
XITONG FANGZHEN YU JIANMO

陈炯聪 主 编
胡春潮 马 凯 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

智能变电站 系统仿真与建模

ZHINENG BIANDIANZHAN
XITONG FANGZHEN YU JIANMO

陈炯聪 主 编
胡春潮 马 凯 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

全书共分7章,主要包括概述;智能变电站关键设备及信息流的建模分析;OPNET 仿真软件的建模与仿真方法;基于 OPNET 的变电站关键协议与策略建模;基于 OPNET 的变电站关键设备建模;智能变电站网络性能仿真平台标准化;智能变电站网络建模与仿真案例。

本书可供工作在各电网(力)公司、电力科研部门及建设施工单位以及其他相关专业领域的过程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

智能变电站系统仿真与建模/陈炯聪主编. —北京:中国电力出版社, 2015.12

ISBN 978-7-5123-7019-7

I. ①智… II. ①陈… III. ①智能系统-变电所-系统仿真
②智能系统-变电所-系统建模 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 000685 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 10.25印张 184千字

印数 0001—2000册 定价 40.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

随着全球范围内智能电网国家战略的推进,作为智能电网重要物理基础的智能变电站建设已经成为一个新的“热点”,或者说2005年起开始的数字化变电站试点建设已经提升为智能变电站试点建设。

“数字化变电站”是指变电站二次控制系统采用数字化电气量测技术,二次侧提供数字化的电流、电压输出信号。变电站信息实现基于 IEC 61850 标准的统一信息建模,自动化系统实现分层、分布式布置,智能电子设备(intelligent electronic device, IED)之间的信息交互以网络方式实现。

智能变电站与数字化变电站既有密不可分的关系,也存在着差别。数字化变电站主要强调手段,而智能变电站更强调目的。概而言之,“数字化是手段,智能化是结果。”

智能变电站的基本特征有:电子式互感器与智能一次设备的应用、基于 IEC 61850标准体系的统一建模、二次信息网络化传输等,其为实现下一代更为先进可靠的电网智能化展现了非常美好的前景。近年来,在一系列关于智能变电站的理论研究和工程实践中,我国的电力工作人员积累了大量成功的经验和案例,为智能变电站自动化技术在我国电网的发展和推广提供了有力的理论和实践支持。目前智能变电站技术的发展也正处于一个“平台期”,集中体现在目前智能变电站实践主要是在新技术层面,关注新设备和新标准协议的应用和探索,而对于与这些新技术相适应的性能分析评价方法、标准规范及工具研发的研究相对较少,对实现变电站智能化的关键——信息流缺乏分析把控能力。就目前已实施的智能变电站工程而言,尚未真正给变电站的运行维护、电网安全可靠性的提升带来实质性的效应,这些都是制约着智能变电站发展的原因。

智能变电站的关键技术之一是二次系统数据信息流的可靠传输,信息流贯穿整个变电站自动化系统。基于测控、继电保护设备等 IED 设备组建的自动化应用系统的可靠性越来越依赖于信息流的有效传输,电网网络性能的评价在一定程度上表现为信息流传输的有效性的评价。目前,智能变电站通信系统的网络性能评价的关注重点往往局限于单一设备指标,不够全面,分析手段也只是基于实际系统的运行实

测,有很大局限性,测试工作量非常庞大而且所花的费用比较昂贵。这样的分析也只是在测试之后,不具有实时性,不能满足我们所需的实时性。而且往往只能针对具体工程具体场景就事论事,难以得出系统普遍适应性的结论;另外,运行实测方法难以通过数学的手段定量分析、比较和重现,以致难以找到关键的影响因素、边界约束条件等。本书围绕以上需求,提出了通过数学建模与仿真的方法,开展智能变电站通信系统网络性能分析,研究智能变电站关键设备与通信网络的建模方法,基于 OPNET Modeler 权威通信仿真软件,开发智能变电站通信系统网络性能评价系统,为智能变电站技术分析、性能评价和方案论证等提供有效的工具。

本书阐述了智能变电站系统的建模与仿真方法。第 1 章介绍了智能变电站的发展历程、技术特点、优势、系统网络仿真现状及通信网络系统对其的重要性;第 2 章主要分析了智能变电站关键设备及信息流建模需求与约束条件;第 3 章从建模架构、仿真机制、模型内涵及自定义建模方法介绍了 OPNET 仿真软件的建模与仿真方法,并通过创建包交换网络的具体实例来说明 OPNET 的具体建模方法;第 4 章讲述了通过 OPNET 通信仿真软件对变电站 IEC 61850 协议、网络同步协议及优化调度策略进行建模;第 5 章在分析变电站合并单元、保护节点、智能操作箱及断路器等关键设备模型的功能、建模难点与方法的基础之上,按要求通过 OPNET 编程进行自定义建模,同时分析变电站站控层设备、交换机和链路等模型的参数配置;第 6 章是在第 4 章和第 5 章完成智能变电站关键协议、调度策略及关键设备模型的基础上,以最简化、统一化、通用化、系列化和模块化的原则,基于 OPNET 对变电站仿真平台进行标准化设计,实现仿真元件标准化、功能标准化和场景标准化;第 7 章介绍了智能变电站自动化系统的网络架构,包括基本组网方式、站控层及过程层网络的组网方案、交换机的组网类型及应用,阐述了智能变电站站控层、过程层及间隔层网络系统的配置,并通过长洲智能变电站的网络建模与仿真案例进一步描述了变电站网络建模仿真的过程与方法。

本书的特点是从全局考虑智能变电站网络系统的建模仿真,基于国际权威通信软件开发出适用于智能变电站网络性能评价的仿真平台,为今后开展电网智能变电站信息流分析和通信网络性能评价开创了一种新的思路 and 有效途径,也为更大范围地开展电网智能化水平评价技术研究提供了借鉴。

本书是作者在广东电网有限责任公司电力科学研究院工作期间完成的。在此感谢项目组中南方电网自动化重点实验室和华南理工大学电力学院的成员给本书编写的支持与帮助。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作 者

2015 年 10 月

目 录

前言

1	概述	1
1.1	智能变电站概述	1
1.2	智能变电站系统网络性能及仿真需求	6
1.3	通信系统对智能变电站的重要性	8
	本章小结	9
2	智能变电站关键设备及信息流的建模分析	10
2.1	关键设备建模分析	10
2.2	信息流建模分析	11
	本章小结	19
3	OPNET 仿真软件的建模与仿真方法	20
3.1	OPNET 仿真软件概述	20
3.2	OPNET 建模编程基础	29
	本章小结	54
4	基于 OPNET 的变电站关键协议与策略建模	55
4.1	IEC 61850 协议建模	55
4.2	网络同步与时钟建模	66
4.3	优化策略建模	71
	本章小结	82
5	基于 OPNET 的变电站关键设备建模	83
5.1	合并单元模型	83
5.2	保护节点模型	86
5.3	智能操作箱及断路器模型	88
5.4	智能变电站站控层设备模型	90
5.5	交换机模型	93
5.6	链路模型	97

本章小结	99
6 智能变电站网络性能仿真平台标准化	100
6.1 标准化目的	100
6.2 标准化原则	101
6.3 标准化内容	102
本章小结	123
7 智能变电站网络建模与仿真案例	124
7.1 智能变电站网络架构	124
7.2 智能变电站系统配置	140
7.3 长洲智能变电站网络建模与仿真案例	146
本章小结	154
参考文献	156

1.1 智能变电站概述

1.1.1 智能变电站简介

智能变电站是伴随着智能电网的概念而出现的，作为电网中的节点，变电站智能化是建设智能电网的重要基础和支撑，其定义是：“由先进、可靠、节能、环保、集成的智能设备组合而成，以高速网络通信平台为信息传输基础，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级应用功能的变电站。”智能变电站具有全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化、高级应用互动化的特点。

智能变电站主要包括智能高压设备和变电站统一信息平台两部分。智能高压设备主要包括智能变压器、智能高压开关设备、电子式互感器等。智能变压器与控制系统依靠通信光纤相连，可及时掌握变压器状态参数和运行数据。当运行方式发生改变时，设备根据系统的电压、功率情况，决定是否调节分接头；当设备出现问题时，会发出预警并提供状态参数等，在一定程度上降低运行管理成本，减少隐患，提高变压器运行可靠性。智能高压开关设备是具有较高性能的开关设备和控制设备，配有电子设备、传感器和执行器，具有监测和诊断功能。电子式互感器是指纯光纤互感器、磁光玻璃互感器等，可有效克服传统电磁式互感器的缺点。变电站统一信息平台功能有两个：一是系统横向信息共享，主要表现为管理系统中各种上层应用对信息获得的统一化；二是系统纵向信息标准化，主要表现为各层对其上层应用支撑的透明化。

智能变电站分为过程层（设备层）、间隔层、站控层。过程层（设备层）包含由一次设备和智能组件构成的智能设备、合并单元和智能终端，完成变电站电能分配、变换、传输及其测量、控制、保护、计量、状态监测等相关功能。

间隔层设备一般指继电保护装置、测控装置等二次设备，实现使用一个间隔的数据并且作用于该间隔一次设备的功能，即与各种远方输入/输出、智能传感器和控制器通信。站控层包含自动化系统、站域控制、通信系统、对时系统等子系统，实现面向全站或一个以上一次设备的测量和控制的功能，完成数据采集和监视控制（supervisory control and data acquisition, SCADA）、操作闭锁以及同步相量采集、电能量采集、保护信息管理等相关功能。

智能变电站由数字化变电站演变而来，经过最近几年的发展，技术已经日臻完善。相比较其他环节，智能变电站已经达到了可以大规模进行推广的条件。智能变电站与传统变电站的最大差别体现在一次设备智能化、设备检修状态化和二次设备网络化三个方面。

在表 1-1 中列举了四种不同变电站自动化系统的几项差异。在经历了十几年的发展、应用后，传统的分层分布式变电站综合自动化系统已经非常成熟，应用非常广泛；随着 IEC 61850 标准的推广，制造报文规范（manufacturing message specification, MMS）以及面向通用对象的变电站事件（generic object oriented substation event, GOOSE）的应用使得变电站内不同厂商的设备之间具有了实现互操作的可能，继电保护跳闸可以通过网络方式来实现；近几年电子互感器、光学互感器技术也在不断的探索中发展，这使得交流采样、跳闸以数字及网络手段实现为主要特征的数字化变电站在国内发展；随着变电站数字

表 1-1 变电站自动化系统比较

比较 类型	自动化 系统比较	与一次设备的 连接比较	与调度主站 联系的比较	通信规约 的比较	高级应用 功能比较	对时系统要 求的比较
传统 变电站	间隔层、站 控层两层结构	常规互感器 及断路器， 电缆连接	仅传四遥 信息	内部规约、 IEC 60870- 5-103 等	基本无高级 应用	仅限于时间 顺序记录系统 (SOE)
IEC 61850 变电站	间隔层、站 控层两层 结构	常规互感器 及断路器， 电缆连接	仅传四遥 信息	全面采用 IEC 61850，支 持设备互操作	仅部分变电站 引入了顺序 控制功能	仅限于 SOE
数字化 变电站	间隔层、站控 层、过程层 三层结构	非传统互感器， 常规断路器和 主变压器	仅传四遥 信息	全面采用 IEC 61850，支 持设备互操作	引入了网络 分析等功能	增加了对采样 同步性的要求
智能 变电站	间隔层、站控 层、过程层 三层结构	智能断路器、 主变压器， 一次设备智能 组件，弱化一、 二次设备的 界限	上传全面的 基础数据及 模型信息	全面采用 IEC 61850， 支持设备互 操作，并兼容 IEC 61970	集成了众多 高级应用功能， 采用一体化的 数据平台	绝对时刻要 高度准确， 全网时钟统一， 采用 IEEE 1588 对时方式

化技术的发展,站内快速采集的信息越来越多,测控装置、保护装置及功角测量装置(phasor measurement unit, PMU)所采集到的信息也十分完整,因此,变电站可以充分发挥本地信息的冗余性和本地决策的敏捷性优势,提高变电站在电网安全运行、调度中的智能化程度;智能化变电站自动化系统是变电站发展的一个方向,它更强调了在计算机、光电技术十分发达的今天,变电站自动化系统的发展不应仅仅停留在采集手段发展的层次,而是要通过这方面的进步达到一个新的高度,即在智能电网中发挥核心管理单元的作用,这也是智能变电站有别于其他几种变电站的重要特征之一。

1.1.2 智能变电站技术特点

(一) 体系结构

智能变电站系统分为过程层、间隔层、站控层。过程层包含由一次设备和智能组件构成的智能设备、合并单元和智能终端,完成变电站电能分配、变换、传输及其测量、控制、保护、计量、状态监测等相关功能。根据国家电网公司相关导则、规范的要求,保护应直接采样,对于单间隔的保护应直接跳闸,涉及多间隔的保护(母线保护)宜直接跳闸。

智能组件是灵活配置的物理设备,可包含测量单元、控制单元、保护单元、计量单元、状态监测单元中的一个或几个。

间隔层设备一般指继电保护装置、测控装置、故障录波等二次设备,实现使用一个间隔的数据并且作用于该间隔一次设备的功能,即与各种远方输入/输出、智能传感器和控制器通信。

站控层包含自动化系统、站域控制系统、通信系统、对时系统等子系统,实现面向全站或一个以上一次设备的测量和控制功能,完成数据采集和监视控制、操作闭锁及同步相量采集、电能量采集、保护信息管理等相关功能。

站控层功能应高度集成,可在一台计算机或嵌入式装置实现,也可分布在多台计算机或嵌入式装置中。

(二) 智能一次设备

高压设备是电网的基本单元,高压设备智能化(或称智能设备)是智能电网的重要组成部分,也是区别传统电网的主要标志之一。利用传感器对关键设备的运行状况进行实时监控,进而实现电网设备可观测、可控制和自动化是智能设备的核心任务和目标。《高压开关设备智能化技术条件》《油浸式电力变压器智能化技术条件》对一次设备智能化做了相关规定。在满足相关标准要求的情况下,可进行功能一体化设计,包括以下三个方面:①将传感器或执行器与高压设备或其部件进行一体化设计,以达到特定的监测或控制的目的;②将互

感器与变压器、断路器等高压设备进行一体化设计,以减少变电站占地面积;
③在智能组件中,将相关测量、控制、计量、监测、保护进行一体化融合设计,实现一、二次设备的融合。

(三) 智能设备与顺序控制

实现智能化的高压设备操作宜采用顺序控制,满足无人值班及区域监控中心站管理模式的要求;可接收执行监控中心、调度中心和当地后台系统发出的控制指令,经安全校核正确后自动完成符合相关运行方式变化要求的设备控制,即应能自动生成不同的主接线和不同的运行方式下的典型操作票;自动投退保护软压板;当设备出现紧急缺陷时,具备急停功能。

1.1.3 智能变电站优势

智能变电站是智能电网的重要内容,变电领域的发展重点是智能变电站,智能变电站对智能电网的建设将起到先驱作用。智能变电站的主要优势如下:

(1) 光纤代替电缆,设计、安装、调试都变得简单;

(2) 模拟量输入回路和开关量输入输出回路都被通信网络所取代,二次设备硬件系统大为简化;

(3) 统一的信息模型,避免了规约转换,信息可以充分共享;

(4) 可观测性和可控性增强,产生新型应用,如状态监测、站域保护控制。

其主要体现在:①引进了电子式互感器、合并单元智能终端、交换机等新装置;②采用了 IEC 61850 标准、IEEE 1588 标准协议;③其中还包括继电保护系统、通信网络结构新体系,同时研发了一些新功能。

而智能变电站的本质优点主要体现在:过程设备数字化,主要为电子式互感器/合并单元、智能终端;信息传输网络化,主要为 IEC 61850 标准及网络通信技术。

变电设备智能状态监测技术还处于发展起步阶段,根据其现状及特点,有以下建议:

(1) 将成熟的监测技术引入电网一次设备,提高智能一次设备的监测有效性和准确性。智能一次设备已成为明确的发展方向,只有进一步提高智能一次设备的实用性,才能保证其良性发展。

(2) 促进智能一次设备状态监测技术与传统二次技术的融合,真正实现测、计、控、检、保五大功能于一体,其信息共享畅通、功能融合良好、运行操作可靠。

(3) 进一步开发智能一次设备的综合分析系统,实现状态评价、寿命预估、故障诊断的高级应用功能,使得智能组件的设备状态综合评价结果与专业技术

人员的评价结果基本一致，智能化水平明显提升。

(4) 加强智能设备入网的检测、检定工作。智能设备尚处于发展阶段，产品不成熟，只有建立健全入网检测、检定工作，将该工作体系化、常态化、标准化、专业化，才能保证产品质量，切实提高一次设备智能化水平。

1.1.4 新一代智能变电站

新一代智能变电站采用了隔离式断路器等新型一次设备，优化主接线设计和总平面布局，节省了占地面积；采用智能变压器等一次设备，近期集成了状态检测传感器和智能组件，远期可进一步集成电子互感器，一次设备的智能化水平大幅提升。

采用稳定可靠的电子互感器技术，解决了电子互感器的长期运行稳定可靠性不足以及抗干扰能力较差等问题，提高了电子互感器的应用成熟度，实现了电压、电流采样的源端数字化，提升了智能变电站数字化水平，保障了电网可靠运行。

采用就地化装置，解决了环境、电磁干扰等对保护装置的影响，减少了数据传输环节，提高了就地装置的运行可靠性；采用合并单元智能终端一体化装置、整合型测控装置，简化了二次电缆布线，全站集成化水平大幅提升。层次化保护控制系统应用取得突破，实现了站域后备保护和站域智能控制策略，突破了间隔化保护控制的局限性，拓展了变电站的智能化应用。

构建一体化监控系统，深化信息综合分析、智能告警、一键式顺控等高级应用功能，解决了目前存在的系统功能分散、集成度低、维护工作量大等问题，提升了变电站监控系统的集成化和智能化水平。

采用数据通信网关机，提供面向主站的实时数据服务和远程数据浏览，满足主厂站信息交互的“告警直传、远程浏览、数据优化、认证安全”的新要求，支撑调控一体化的业务需求。

采用基于虚拟装置、数字化工具的一体化监控集成调试环境，大大简化了调试工作量，缩短了变电站建设调试周期。采用全站运行状态监测和远程可视化技术，通过数字化工具简化变电站日常运行和维护工作量，提高了智能变电站运维的便利性。

总体上，新一代智能变电站采用集成化智能设备和一体化业务系统，采用一体化设计、一体化供货、一体化调试模式，实现“占地少、造价省、可靠性高”的目标，打造“系统高度集成、结构布局合理、装备先进适用、经济节能环保、支撑调控一体”智能变电站。

1.2 智能变电站系统网络性能及仿真需求

1.2.1 智能变电站网络性能评价现状

目前智能变电站集成内容包括变电站自动化、在线监测、视频及环境监控和生产管理等模块内容。虽然变电站中各应用模块对变电站的关注点不同,但所关注的对象都是变电站内相同的设备,其区别仅在于获取信息的种类、细度、层次、角度及其实时性等。在智能变电站中,所有设备的功能和数据按 IEC 61850 建模,采用映射到制造报文规范的抽象通信服务接口 (abstract communication service interface, ACSI)、面向通用对象的变电站事件、采样值 (sampled values, SV)、简单网络时间协议 (simple network time protocol, SNTP) 等通信协议实现各种通信功能。基于 IEC 61850 的面向对象的数据自描述服务,一次智能设备将同步采集的母线电压、电流、有功功率、无功功率、频率等电气量及变压器油温、断路器内 SF₆ 压力和隔离开关的开合位置等非电气量转换为标准的数字信号输出。根据规定的以太网数据传输格式上传至间隔层网络,供其内的各个系统调用。上述技术确保了数据的真实性、一致性和完整性,使变电站真正实现了“一方录入,多方使用”的数据交换功能,统一了变电站各专业数据描述、数据格式,为多专业、多维度驾驶舱技术的应用提供了良好的数据基础平台。智能变电站过程层信息流主要包括 SCADA “四遥”、AGC (自动发电量控制)/AVC (自动电压控制)、SV/GOOSE、同步等,囊括了采样数据、开关状态等反映电网运行状态的数据、跳合闸命令等保护、备自投等 IED 设备的决策控制命令、五防闭锁命令等。其中以电压、电流互感器和保护测控单元之间的实时电压、电流采样值和保护单元发送到现场开关设备的保护信号的信息传输时间需求最为紧急,数据优先级最高。采样过程中,故障录波系统所用数据的采样频率最高,测控保护所需数据的采样频率低于计量用的数据。通过建立变电站的业务模型、业务过程模型和数据模型,在确保网络传输通畅的前提下,可以保证上传到各个不同应用模块中的数据的准确性,为变电站正常和事故情况下的安全稳定运行奠定了基础。

随着智能变电站的集约化功能越来越强大,对网络通信的依赖也变得越来越强烈,但因为变电站的运维人员基本为电力相关专业出身,对通信技术的了解不是很深入,而且智能变电站的信息传输基本全部依靠光缆,按照常规变电站的思维模式,从施工蓝图中只能查到光缆的连接设备和连接端口,光缆中传输的具体信息并不能在设计蓝图中反映,对日常的运行维护造成诸多不便,对

常规的运维模式也提出了挑战。

目前对于智能变电站网络性能评价研究手段主要有以下三种方法：

(1) 测量法。通过对变电站内设备进行观察实测，得到相关设备的实际运行指标，然后进行综合分析。测量法可以实现端到端的测试、端到 2~3 端的测试，实现方式简单。但是测量法受规模一定影响，其经济代价高，费用昂贵。测量法时效性低，同时需要存在的网络实体设备，一般在网络的中后期开展，有一定的风险，其无法应用于变电站网络的设计和规划。

(2) 解析法。对变电站内网络及设备，通过解析法建立模型，联立方程组来求解。解析法比测量法费用低，时效性高。但解析模型的建立是一个难点，一般对于复杂系统，较难选择一个解析方程来表示物理系统。建模过程受系统规模影响很大，一般节点数不超过 30，其实用性差，不适用于存储空间有限的计算系统，对于复杂耦合关系系统，难以获得性能的解析解。

(3) 仿真法。运用各种模型和技术，对变电站网络及设备进行建模，通过模型采用仿真的手段，来理解需要解决的实际问题。可以以 1 比 1 的比例，模拟实际变电站，仿真精度取决于仿真模型建模深度及其覆盖率。就目前网络水平发展来说，一般意义不受研究对象的规模限制。与解析法一样具有研究费用低、时效性高等优点。

现阶段，电网设计人员和变电站工作人员一般使用测量法和解析法来评估变电站网络性能，尚未建立完整的变电站仿真模型及开发出一套有效的网络性能评估平台，使得智能变电站设计、运行方式选择、组网方式配置等，缺少科学有效的手段。

1.2.2 系统仿真需求与平台

由于智能变电站过程层网络的引入，智能变电站继电保护系统的数据采集、传输、处理及输出过程与传统微机保护有很大差异，其动作性能与可靠性备受关注，由此给继电保护的安全可靠运行带来了挑战。目前，由于缺乏有效的分析方法和分析工具，针对智能变电站二次网络及其继电保护等应用系统的性能分析与研究评估几乎是空白，对智能变电站二次网络实时性和可靠性的认知尚未形成统一认识。因此通过仿真软件实现智能变电站通信网络、IED 设备算法与逻辑及其数据交换过程的定量仿真就变得十分必要和迫切。

作为国际上一种主流通信网络仿真软件，OPNET Modeler 近年来被应用于电力系统通信网络的仿真分析中，主要应用包括拓扑网架分析、定性的实时性计算、定性的解释性机理描述等，显示出良好的发展前景。然而，已有的研究工作仍主要停留在对 OPNET 已有模型和功能的介绍层面，对变电站网络建模

与仿真也局限于定性层面，主要表现在：

(1) 对 IEC 61850 标准建模不足，不能真实描述智能变电站中的实际数据处理过程，难以进行定量分析；

(2) 对自动化应用 IED 建模不足，缺少 IED 设备算法与逻辑的详细建模，难以描述 IED 设备的实际性能；

(3) 限于 OPNET 自带模型，没有面向变电站网络及应用的全面建模，难以应用于实际工程。

因此亟待建立适用于智能变电站的网络模型，配置仿真参数，由仿真软件模拟计算二次系统静态和动态过程，构建一套能够反映变电站网络通信系统运行机制及其定量分析网络性能的评价仿真平台，为变电站通信网络规划与设计提供流量分析的依据，同时可以模拟和分析变电站运行中信息交换的动态过程，适用于变电站运行的全生命周期。

1.3 通信系统对智能变电站的重要性

智能变电站是衔接电网发、输、变、配、用电和调度六大环节的关键，为智能电网提供标准的、可靠的节点支撑，而通信网络又是智能变电站的“神经系统”，是连接变电站内各种智能电子设备的纽带，通信系统的实时性和可靠性直接决定变电站的可用性，任何细微的性能问题都有可能带来灾难性后果，造成巨大的政治和经济影响。2000 年 10 月 13 日，四川二滩水电厂控制系统因收到异常信号而停机，7s 甩出了 89 万 kW 的电量，川渝电网几乎瓦解。2003 年美加 8·14 大停电持续时间为 29h，损失负荷 61 800MW，受停电影响人口 5000 万，地域约 24 000km²。其中一个重要原因就是：大量数据在电网故障后涌入第一能源公司，大量报文因 RTU 出现排队和缓冲区溢出现象而丢失，随之而来的是中西部调度中心的状态估计功能服务器失效，最后 AGC 等控制系统故障。

通常通过选择高可靠性的网络拓扑和采用冗余技术来保证通信系统的可靠性。实际工程的应用方案中，IED 都具备双网卡，分别接入两台交换机。通信网络系统结构设计时要综合考虑可靠性、易维护性和经济性等众多因素，属于优化问题。

人们也很关注变电站通信系统的实时性。IEC 61850 严格详细规定了变电站综合自动化系统 (substation automation system, SAS) 的报文性能，报文根据不同的延时要求被划分为快/中/低速跳闸报文、命令报文、数据生成报文、传输文件报文、时间同步报文共七类，其中“快速跳闸报文”和“数据生成报文”的延时要求为 3ms。国内外研究人员开展了大量试验来进行以太网在变电站通

信系统中应用的可行性研究,结果证明若采用 100M 以太网和 Multicast (多播)技术,网络在正常情况下最大的通信延时能够满足实时性要求,且有一定的宽裕度。但当网络发生异常情况时(如出现数据风暴或由于接入新设备而造成的网络负载骤增等)是否仍能满足实时性要求还有待进一步讨论。

在 2000 年国际大电网会议上就有学者指出:变电站综合自动化领域的主要动力来自于网络通信领域的进展。智能变电站将是一个庞大的,集测量、分析、控制于一体的智能系统,保证系统之间各功能模块快速、高质量的通信将是系统功能实现的关键,通信系统的信息吞吐、处理能力、开放程度和可靠性是智能变电站的主要指标。IEC 61850 标准的制定、颁布及其在数字变电站中的应用为智能变电站构建标准的通信体系奠定了良好基础,将变电站划分为站控层、间隔层和过程层的思想为智能变电站通信网架划分提供了新思路。另外以太网技术的长足发展也为智能变电站通信系统性能的提高提供了有利的技术支撑。

本章小结

本章介绍了智能变电站的发展历程、技术特点、优势、系统网络仿真现状及通信网络系统对其的重要性。智能变电站技术是综合自动化系统技术发展的延伸,具有全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化、高级应用互动化的特点。信息基于 IEC 61850 标准建模,实现不同厂家 IED 之间信息的互联、互操作。仿真法是研究智能变电站网络性能评价的必然选择,其优于目前主要的测量法和解析法,但尚未建立完整的变电站仿真模型及开发出一套有效的网络性能评估平台,因此通过仿真软件实现智能变电站通信网络、IED 设备算法与逻辑及其数据交换过程的定量仿真显得十分必要和迫切。

智能变电站关键设备及信息流的建模分析

2.1 关键设备建模分析

2.1.1 含 IEC 61850 协议的智能变电站设备

同传统的 IEC 60870-5-103 标准相比, IEC 61850 不仅是一个单纯的通信规约, 而且是智能变电站自动化系统的标准, 指导了变电站自动化的设计、开发、工程、维护等各个领域。该标准规定了变电站自动化系统中对象的统一建模方法, 采用面向对象技术和独立于网络结构的抽象通信服务接口, 增强了设备之间的互操作性, 从而大大提高了变电站自动化技术水平和安全稳定运行水平, 实现了完全互操作。IEC 61850 的引入, 一方面很好地解决了网络通信、变电站内信息共享和互操作及变电站的集成与工程实施等问题, 但是另一方面, 对建立变电站仿真平台提出了新的要求和框架。因此提高变电站网络性能分析仿真精度, 含 IEC 61850 协议的变电站设备建模显得尤为重要。

2.1.2 含对时同步的智能变电站设备

高精度数据同步是实现信息共享的重要前提和基本属性, 继电保护、SCADA、PMU 等应用系统都对数据同步有着极高的要求, 因此数据同步成为智能变电站技术的核心问题而备受关注。IEEE 1588 精密时钟同步协议对时方式与智能变电站基于 IEC 61850 的网络化传输方式相匹配, 可与其他报文共享网络资源, 消除了 NTP/SNTP 协议方式时间戳标记误差, 同步精度达到亚微秒, 正在成为智能变电站的下一代先进数据同步方式, 具有良好的发展前景。因此建立统一的时间基准是各种保护、控制设备协同工作, 提高电网运行水平的基本要求, 也是电网事故中各设备动作行为的重要依据, 通过模拟遵循 IEC 61850 标准的变电站通信网络拓扑结构, 提出 IEEE 1588 在变电站内的应用方案, 通过仿