

# 电力系统多尺度仿真 与试验技术

主编 汤涌 印永华

DIANLI XITONG DUOCHIDU FANGZHEN  
YU SHIYAN JISHU



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

中国电力科学研究院专著出版基金资助

# 电力系统多尺度仿真 与试验技术

主编 汤 涌 印永华  
参编 周泽昕 朱艺颖  
田 芳 卜广全



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 简 介

本书是一本详细介绍国家电网仿真中心建设成就和电力系统仿真与试验技术最新研究成果的专著。全书共分六章,包括绪论、电力系统动态模拟实验室、电力系统数模混合仿真实验室、电力系统运行及安全监控仿真实验室、国家电网仿真计算数据中心、电力系统数字仿真软件。

本书可供从事电力系统调度运行、规划设计和仿真试验的工程技术人员以及高等院校电气工程专业的师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统多尺度仿真与试验技术 / 汤涌, 印永华主编. —北京: 中国电力出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3712 - 1

I. ①电… II. ①汤…②印… III. ①电力系统 - 系统仿真  
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 265360 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 27.625 印张 626 千字

定价 120.00 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

为满足我国未来持续增长的电力需求，实现更大范围的资源优化配置，推动电力工业技术创新和能源的高效开发利用，促进经济社会可持续发展和全面建设小康社会，国家电网公司提出了建设以 1000 千伏级特高压交流和  $\pm 800$  千伏级特高压直流输电系统为核心的坚强国家电网的战略思想。西南水电和北方煤电基地将采用特高压交流或直流输电系统实现电力外送，形成覆盖大电源基地和负荷中心的特高压交直流混合电网，形成特高压交直流输电系统并列运行的格局。因此，无论从装机容量和电源构成，还是从输电联网方式、电压等级和电网覆盖面来看，我国电网都将成为世界上最庞大最复杂的电网。在这一重要的发展阶段，迫切需要建立与电网发展新形势和新技术相适应的电力系统仿真与试验研究中心，对新的关键技术问题进行深入的仿真与试验研究。

2006 年 4 月，国家电网公司下达了“国家电网仿真试验研究中心建设”的重大科技项目，要求建设能够为国家电网提供强有力的技术支持和技术服务的国家电网仿真中心，成为国家电网公司的电网技术研究实验基地、电力行业的高层次人才培养和培训基地以及国际技术交流、合作的实验基地。

国家电网仿真中心建设的主要内容是围绕我国特高压电网和大型交直流混合电网的建设和运行安全需要，针对大型交直流混合电网规划、设计、建设和运行技术，建立电力系统全数字仿真、动态模拟、数字模拟混合仿真、运行和安全监控等试验研究基础设施。依托国家电网仿真中心，开展电网规划、跨区互联电网、交直流并联电网、多直流接入受端电网安全稳定运行、大电网仿真技术等重大关键技术研究，全面掌握大型复杂电网运行和控制机理，实现电网事故预演和大电网动态安全预警，建立具有我国自主知识产权的大型复杂电网仿真与试验的核心技术体系。

国家电网仿真中心位于中国电力科学研究院的北京清河院区，由电力系统数模混合仿真实验室、电力系统动态模拟实验室、电力系统运行仿真及安全监控实验室以及仿真计算数据中心构成。仿真中心建设过程中，研究开发了电力系统动态模拟系统、数字模拟混合仿真系

统、电力系统全数字仿真系统、电力市场仿真系统、运行和安全监控系统等试验研究基础设施，各个组成部分互为补充、紧密结合，构成结构完整、功能完备、技术先进的电力系统仿真研究体系，实现电力系统多尺度全过程仿真与试验研究。

国家电网仿真中心已广泛应用于全国电力系统的规划、运行、装备制造、科研教学等领域，完成了国家电网发展规划、1000 千伏晋东南－南阳－荆门特高压交流试验示范工程、1000 千伏晋东南－南阳－荆门特高压交流试验示范工程扩建工程、向家坝－上海  $\pm 800$  千伏特高压直流输电工程、青藏电力联网、西北大规模风电并网等重大工程的规划、设计、调试和运行的仿真与试验研究，以及新型继电保护和智能变电站系统性能验证等，经受了工程实践的考验，有力地促进了我国电网仿真与试验技术的进步，推动了大功率电力电子装置、电力系统控制保护等相关电力设备产业发展。依托国家电网仿真中心已建成“电力系统仿真国家工程实验室”和“电网安全与节能国家重点实验室”。

本书是国家电网仿真中心建设成果的总结。本书第一章由印永华和汤涌编写；第二章由周泽昕、周春霞、杜丁香、董明会、詹荣荣、李仲青、杨国生、李岩军、张晓莉、艾淑云、项灿芳、詹智华、贾琰、沈晓凡、张烈、李明、赵凯超编写，周泽昕负责统稿；第三章由朱艺颖、蒋卫平、胡涛、谢国平、芮虎、孙栩、周俊、吴娅妮、张晋华编写，朱艺颖负责统稿；第四章由田芳、何江、周海明、于之虹、刘树春、史述红、徐得超、李伟刚、魏文辉、李亚楼、严亚勤编写，田芳负责统稿；第五章由卜广全、陶向红、肖静、张彦涛编写，卜广全负责统稿。第六章由汤涌编写。汤涌和印永华对全书进行了审定。国家电网仿真中心的建设过程中，得到了国家电网公司和中国电力科学研究院各级领导和专家的大力支持和悉心指导，中国电力科学研究院百余名科研人员参与了项目研究，为本书的完成奠定了基础。在此表示衷心感谢！

限于作者水平和实践经验有限，书中难免有不足或有待改进之处，尚希读者不吝指正。

编 者  
2013 年 2 月

# 目 录

## 前言

## 第一章 绪 论

1

- 第一节 电力系统仿真与试验技术发展概况/3
- 第二节 国家电网仿真中心概况/5
- 第三节 国家电网仿真中心的主要功能和技术突破/9

## 第二章 电力系统动态模拟实验室

15

- 第一节 概述/17
- 第二节 电力系统动态模拟实验室构成/26
- 第三节 主要元件的模拟方法/32
- 第四节 动态模拟试验系统/82
- 第五节 动态模拟技术应用实例/94
- 第六节 动态模拟技术的发展方向及应用前景/110
- 参考文献/111

### 第三章 电力系统数模混合仿真实验室

113

- 第一节 概述/115
- 第二节 物理模拟元件/117
- 第三节 数字仿真模型/163
- 第四节 全数字实时仿真与物理模拟连接技术/184
- 第五节 数模混合仿真实验介绍/218
- 第六节 数模混合仿真试验研究实例/232
- 第七节 应用与展望/237
- 参考文献/239

### 第四章 电力系统运行及安全监控仿真实验室

241

- 第一节 概述/243
- 第二节 电力系统全数字实时仿真/245
- 第三节 电力系统动态安全评估与预警/264
- 第四节 电网调度自动化系统/285
- 第五节 调度员培训模拟系统/295
- 第六节 电力市场仿真系统/298
- 第七节 实验室系统间接口技术/306
- 参考文献/310

## 第五章 国家电网仿真计算数据中心

313

- 第一节 国内外电网仿真计算数据管理概况/315
- 第二节 数据中心建设的关键技术和创新点/317
- 第三节 国家电网仿真计算数据中心的体系构成/328
- 第四节 数据的导入与导出/352
- 第五节 数据中心的应用/354
- 第六节 国家电网仿真计算数据管理框架/355
- 第七节 仿真计算数据中心发展展望/360
- 参考文献/363

## 第六章 电力系统数字仿真软件

365

- 第一节 概述/367
- 第二节 电力系统数字仿真与建模研究的新进展/368
- 第三节 PSD 电力系统分析软件包/373
- 第四节 电力系统分析综合程序/401
- 第五节 电力电子与电磁暂态仿真软件/422
- 参考文献/430

# 第一章

## 绪论





## 第一节 电力系统仿真与试验技术发展概况

### 一、电力系统动态模拟技术

20 世纪 60 年代以前,电力系统仿真主要采用全物理的动态模拟装置,由按比例缩小的旋转发电机、电动机、变压器、线路等元件构成,动态模拟技术的优点是能够比较精确地反映物理现象,适合于对原始物理现象和系统特性的研究,以及对继电保护和自动控制装置的试验研究等。动态模拟技术的发展趋势是:集先进的模拟、测试、控制、分析技术于一体的动态模拟试验技术,具备特高压交直流系统、新型设备和 FACTS 元件的动态模拟试验环境。

### 二、电力系统数模混合仿真技术

电力系统数模混合仿真技术是指发电机、电动机等旋转设备采用数学模拟方法,变压器、交流输电线路、直流输电换流阀组和控制装置等元件仍采用物理模型,能够比较精确地反映交直流系统的物理现象,是交直流电力系统运行特性和控制保护装置等的主要试验研究工具。与全物理的动态模拟系统相比,设备维护工作量和建模复杂程度减少。数模混合仿真技术的发展趋势是:实现电力系统全数字实时仿真装置与模拟仿真装置的功率连接技术,综合利用物理模拟、数模混合及全数字实时等多种仿真手段,实现大规模复杂特高压交直流混合电网的仿真。

### 三、电力系统运行及安全监控仿真试验研究技术

电力系统运行及安全监控仿真试验研究是一个新技术,以一个大规模实时仿真的数字电力系统(用于模拟实际的电力系统)为监控对象,采用全数字实时仿真技术,模拟大规模数字电力系统,进行电力系统安全监控技术的开发研究,包括由 SCADA/EMS、WAMS、故障信息管理系统等构成综合信息平台,对电力系统调度、运行、控制等新技术进行模拟运行测试;同时,还能对电力系统调度运行人员进行培训。

### 四、电力系统仿真计算数据管理技术

长期以来,由于电力系统仿真计算分析用的主设备参数管理比较混乱,各个电网建模工作的进展程度参差不齐,模型参数实测仿真建模工作的单位技术水平良莠不齐,导致建模数据质量难以保证。

国家电网公司针对电网计算分析数据管理工作的现状,提出了建立集中管理、准确合理、安全规范、充分共享的国家电网计算分析数据管理体系的要求。通过国家电网仿真计算数据中心的建设,构建能够满足与网省调度进行数据交换的硬件平台以及软件支撑平台,实

现与网省调度通过安全的通道进行数据交换；实现与国家电网公司规划业务系统接口，获取电网规划、建设信息；基于 20 多年数据库开发及应用经验，开发能够满足数据中心当前业务需求的电力系计算数据库管理及其相关高级应用平台软件平台。该平台实现设备的全生命周期管理、规划和调度数据统一；具备设备参数版本管理功能，使设备参数具备可追溯性；通过 GIS 系统抽取设备形成图形，实现图形化管理数据；能够抽取设备，补充参数，智能化生成电网计算分析数据。

## 五、国外电力系统仿真实验室概况

### 1. 俄罗斯直流研究院（NIPT）的动态模拟实验室

该实验室为全物理模拟，面积  $2700\text{m}^2$ ，有 80 台旋转同步发电机、150 套电力变压器模型、700 个线路链和 20 个双桥 12 脉冲晶闸管换流器模型，并配置了数十台用于负荷模拟的异步电动机。1997 ~ 1998 年，我国曾在该动态模拟实验室进行了三峡电力系统的动态模拟试验研究，对三峡输电系统规划方案进行了验证。

### 2. 加拿大魁北克电力研究所（IREQ）的仿真实验室

该实验室在原有物理模拟装置的基础上，增加了全数字实时仿真装置。实验室面积  $1000\text{m}^2$ ，有数字发电机模型 34 组，交流电源 100 台，三相线路 600 链，变压器模型 130 组，动态负荷 14 组，直流换流器（12 脉冲）16 组，感应电动机模型若干组。实验室分多个区，可以同时开展 10 项试验，其中最大的一个区是固定模拟魁北克 735kV 电网和魁北克—新英格兰多端直流输电系统，以便随时解决系统中出现的问题。

### 3. 日本中央电力研究所（CRIEPI）交直流电力系统仿真实验室

该实验室建成于 1968 年，此后进行了多次改扩建，具有数模混合仿真能力。目前有电源 3 套、直流换流器（12 脉冲）模型 8 组，输电线路模型 1000km。

### 4. 巴西中央电力研究院（CEPEL）交直流系统仿真实验室

该实验室原为研究伊泰普电站及其输电系统而建，具有数模混合仿真能力。有电机模型 5 组、直流换流器（12 脉冲）6 组、交流输电线 4000km、直流输电线 10 000km。为开展亚马逊河流域水电开发及直流输电系统研究，对实验室进行了扩建，增购发电机模型 16 组，并与其他公司合作开发线路模型、直流换流器模型等。

### 5. ABB、SIEMENS 等制造商的仿真实验室

ABB、SIEMENS 等制造商都拥有规模齐全为数模混合式交直流电力系统仿真实验室，目前主要采用数模混合式交直流模拟装置进行直流输电工程的试验研究工作。

### 6. 韩国电科院仿真实验室

该实验室采用全数字实时仿真技术，引进了 26 个 RACK 的 RTDS（实时数字模拟）装置。目前该实验室正利用 RTDS 装置建立韩国的交流电网系统模型，并与物理直流模拟装置连接，进行交直流系统试验研究。

## 第二节 国家电网仿真中心概况

国家电网仿真中心是依托中国电力科学研究院建成的具有自主知识产权的电力系统仿真与试验系统，主要由四部分组成：电力系统动态模拟实验室、电力系统数模混合仿真实验室、电力系统运行及安全监控仿真实验室和国家电网仿真计算数据中心。结合中国电力科学研究院研发的各类电力系统数字仿真软件，各个组成部分在功能上互为补充，紧密结合（见图1-1），构成了功能完备、综合仿真试验能力世界领先的电力系统仿真与试验系统，具备了从设备、厂站到特大规模电网的多空间尺度仿真试验研究能力，具备了从电磁暂态、机电暂态到中长期动态的多时间尺度全过程仿真研究能力，对我国电网发展规划和安全运行发挥着重要的作用。



图 1-1 国家电网仿真中心功能定位示意图

### 一、电力系统动态模拟实验室

电力系统动态模拟技术作为电力系统模拟研究领域成熟和重要的技术手段，具有实证性强、技术成熟、仿真结果准确可靠等技术特点，是最接近于电力系统运行实际的模拟试验手段，随着电压等级的提升、新型电力设备的应用，电力系统动态模拟手段也要同步发展。

国家电网仿真中心的动态模拟系统集成先进的模拟、测试、控制、分析技术于一体，能够模拟 1000、750、500、220（330）kV 及以下各电压等级的电力系统，能够实现含直流输电、1000kV 特高压同杆并架输电线路、可控串联补偿器（TCSC）、可控并联电抗器（CSR）等新

型设备的交直流系统动态模拟，能够开展线路保护、变压器保护、电抗器保护、母线保护、发电机保护、电动机保护、功角测量装置、安全稳定控制装置、发电机自动调节系统、自动减载装置、重合闸装置、故障录波器等的试验研究，具有数字式电流、电压采集设备，可以进行我国各电压等级系统的各种控制保护装置、通道特性影响和传输规约影响的测试，具备对静止无功补偿器（SVC）、TCSC、静止同步补偿器（STATCOM）、CSR 等新型电力电子设备和元件的控制保护系统性能指标进行验证测试的能力。电力系统动态模拟实验室控制大厅见图 1-2。



图 1-2 电力系统动态模拟实验室控制大厅

## 二、电力系统数模混合仿真实验室

电力系统数模混合仿真技术将数字仿真和物理模拟相结合，能更精确地反映交直流系统的物理现象，是交直流电力系统运行特性和控制保护装置等的主要试验研究手段。

国家电网仿真中心的电力系统数模混合仿真系统的直流模拟仿真装置能够模拟 4 个  $\pm 500\text{kV}$  双极长距离直流输电系统、2 个  $\pm 800\text{kV}$  双极长距离直流输电系统和 1 个背靠背直流输电系统的规模，具备同时对 7~8 项直流输电工程进行模拟仿真的能力。通过与全数字实时仿真系统实现连接之后，可以拥有较完善的交直流输电系统仿真模型，可以对大规模交直流混合电力系统同时开展从电磁暂态到机电暂态全物理过程的仿真，能够开展对特高压大电网中交直流输电规划方案的技术合理性和实时进行系统的安全稳定等装置的开发验证等试验研究工作。电力系统数模混合仿真实验室见图 1-3。



图 1-3 电力系统数模混合仿真实验室

### 三、电力系统运行及安全监控仿真实验室

国家电网仿真中心的运行及安全监控仿真系统采用全数字实时仿真技术,模拟大规模数字电力系统,进行电力市场环境安全监控技术的开发研究。系统具备机电暂态并行仿真、电磁暂态并行仿真和机电暂态—电磁暂态混合仿真功能,初步具备大规模交直流电力系统的实时仿真能力,利用分布式并行计算技术,基于成熟的商用电力系统分析综合程序(PSASP),可以高效、快速地实现大批量故障扫描计算,动态安全评估和预警系统具备基于在线数据的暂态稳定故障扫描功能。

已实现国家电网骨干网架(110kV及以上)的实时数字仿真,包括具备模拟特高压直流输电系统的仿真能力,具备模拟继电保护、安全自动装置的功能和动作特性的能力,利用分布式并行计算技术,基于电力系统在线实时数据和动态信息,在给定的时间间隔(5~15min)内,高效、快速实现大规模电力系统的动态安全评估,给出稳定极限和调度策略,采用SCADA/EMS系统、广域监测保护控制系统、电力交易系统和电网动态安全预警系统一体化设计方案,利用基于EAI(企业应用集成)技术开发设计了数据平台系统以及企业服务总线(ESB),采用新一代数据库、人机交互技术及可视化技术,开发出了具有高可靠性、安全性、可扩充性、具有跨平台和混合平台支撑能力的系统支撑平台,实现不同应用之间的动态调用、协同、共享和聚合调用。能够满足大规模交直流混合电力系统试验研究的要求,实现对电力系统动态过程的监测、分析、预警和控制,满足对电力市场环境下的安全监控及预警的需求。电力系统运行仿真及安全监控实验室见图1-4。



图1-4 电力系统运行仿真及安全监控实验室

### 四、国家电网仿真计算数据中心

随着我国电网规模的逐步扩大,仿真计算数据的建立和维护工作已成为一项复杂的系统工程,必须加强统一管理。需要制定全国互联网稳定计算数据管理办法,建立统一的计算数据管理平台,定期提供适应各种需要的计算数据。要加强对励磁、调速、直流和灵活交流输电等控制系统的入网管理,新型控制系统在入网检测时,要同步确定其用于稳定计算的模

型及参数，及时纳入计算数据库管理。

电力系统计算数据管理中心主要为电力系统的调度运行部门进行计算分析提供数据服务，其目标是要解决当前电力系统计算分析用的设备运行参数管理分散、零乱，数据来源不明确性，数据的唯一性和可靠性差，不同区域的数据难以交换等问题。建立和健全数据的管理制度，对于数据库中的数据做到来源明确，有据可查；兼容规划数据中心的规划电网数据，建立一个集中管理、准确合理、安全规范、最终实现数据资源充分共享的数据管理中心。国家电网仿真计算数据中心大厅见图 1-5。



图 1-5 国家电网仿真计算数据中心大厅

## 五、国家电网仿真中心建设的意义

电力系统是结构复杂、地域广大的超大型人造非线性动态系统，研究并掌握其运行特性，对电力系统的安全稳定运行极为重要。但是，在实际电力系统中做试验极为困难，对电力系统的运行特性特别是受扰动后的动态特性的研究，必须通过仿真与试验来完成。因此，需要功能强大的电力系统仿真与试验研究手段。

特高压电网、大煤电、大水电、大核电和大型可再生能源发电（“一特四大”）是我国电力系统发展的趋势，面对“一特四大”的电网络局，更需要功能完备的电力系统仿真与试验手段，以满足我国电网规划设计、运行控制和科学研究的需求。

电网安全稳定是世界电力领域共同面临的重大科技难题。近年来国际上大电网安全稳定事故的频频发生，引起了各国的广泛重视。2003 年北美“8·14”大停电，导致损失负荷 6180 万 kW，经济损失上百亿美元。2006 年“11·4”西欧大停电，损失负荷约 1454 万 kW，约 1000 万人受到影响。在澳大利亚、英国、瑞典、丹麦、意大利、俄罗斯等国家相继发生的较大范围的停电事故，给社会经济和生活各方面造成了巨大的影响，引起了世界各国的广泛重视，控制电网安全稳定事故的风险成为世界范围的重大技术难题。

通过科技创新降低电力系统安全稳定运行的风险是世界各国共同采取的重要措施。美国政府曾经就电网安全公开表示“电网的安全稳定对国家安全至关重要”，并提出了“2008 年电网运行控制研究路线图及电力战略防御基础设施（SPID）计划”。法国开展了“电网安全

防御研究计划”。俄罗斯开展了“集中紧急预防自动控制系统（CEPAC）研究”。我国在电网安全稳定技术研究保持着持续的投入，2006年颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将“超大规模输配电和电网安全保障”列入能源领域的优先主题，国家电网公司在“十一五”科技发展规划中将“大电网安全稳定技术”作为重大关键技术领域，制定了《大电网安全及控制关键技术研究框架》。开展新一轮的电网安全稳定技术的研究，建设国家电网仿真中心是必不可少的基础条件。

国内外的工程实践证明，电力系统仿真与试验手段是研究和掌握电力系统运行特性的基础。在重大电力工程的规划、设计、建设和运行的各个阶段，都需要进行深入细致的仿真试验研究。国际上很多国家和跨国公司（如加拿大、日本、巴西、韩国和ABB公司、SIEMENS公司等）均建设了较大规模的电力系统仿真实验室。

在我国电网发展的各个重要阶段，从330、500、750kV到1000kV交流，从 $\pm 500$ 、 $\pm 660$ kV到 $\pm 800$ kV直流，从区域电网建设、三峡电网建设到区域电网互联，都通过电力系统动态模拟系统、交直流数模混合仿真系统和电力系统数字计算软件进行了大量的仿真与试验研究。

国家电网仿真中心的建设，对于满足我国未来持续增长的电力需求，实现更大范围的资源优化配置，全面推动我国电力系统仿真、电网运行控制等技术的发展，满足全国联网、特高压交直流输电系统规划设计、工程建设和调试、运行维护等实际需要，促进我国经济社会可持续发展具有十分重要的意义。

### 第三节 国家电网仿真中心的主要功能和技术突破

国家电网仿真中心通过对电力系统动态物理模拟、数模混合半物理仿真、全数字仿真和基础数据库等关键技术进行全面系统的攻关研究，充分发挥不同仿真手段的技术优势，共同构成一整套科学合理的电力系统仿真与试验研究体系，各部分功能互为补充、相辅相成，具备对大规模交直流互联电网进行多角度、多层面仿真模拟试验研究能力，可开展国家电网特高压骨干网架规划方案、特高压大电网安全稳定性能及安全稳定控制技术、特高压/超高压交直流输电控制保护系统功能、新型电力电子设备性能、电力市场环境下电网安全运行等仿真试验，为国家电网规划、建设和运行提供强有力的技术支撑和技术服务。

#### 一、电力系统动态模拟实验室的功能

电力系统动态模拟作为电力系统仿真领域成熟和重要的技术手段，继续充分发挥其实证性强、仿真结果准确可靠等技术特点。在原有基础上，研制特高压交直流输电系统、电力电子元件、典型负荷元件、发电机、数字互感器及实验室量测、记录、控制等模拟设备，使得动态模拟实验室具备模拟特高压输电系统和多种新型电力设备的能力，重点开展特高压输电