

现代电力系统丛书



电力系统并行计算与数字仿真

周孝信 田芳 李亚楼 郑超 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书



电力系统并行计算 与数字仿真

周孝信 田芳 李亚楼 郑超 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了电力系统两种基本过程——机电暂态过程和电磁暂态过程的仿真分析方法,包括用于机电暂态仿真和电磁暂态仿真的电力系统元件数学模型;同时结合作者多年从事相关科研成果,系统地介绍了电力系统数字仿真的新技术,包括机电暂态并行仿真方法、电磁暂态并行仿真方法、机电-电磁暂态混合并行仿真方法、数字仿真装置与物理装置联合仿真方法、电流源换流器型直流输电系统建模与仿真等。

本书适合于从事电力系统分析及数字仿真领域研究的科研和技术人员以及高等院校电力系统专业的教师和研究生阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力系统并行计算与数字仿真/周孝信等著.--北京:清华大学出版社,2014

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-34814-6

I. ①电… II. ①周… III. ①电力系统—系统仿真 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 310984 号

责任编辑:张占奎

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:22.25 彩 插:2 字 数:440千字

版 次:2014年10月第1版

印 次:2014年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:88.00元



产品编号:029585-01

作者简介

周孝信 1940年4月7日出生于山东省蓬莱市,1965年毕业于清华大学电机工程系。1979—1980年赴加拿大魁北克省水电局进修。1984年获得人事部“国家有突出贡献的专家”称号。1991年被评为享受国务院政府特殊津贴专家。1993年当选为中科院学部委员(后改称为中国科学院院士)。1995年当选 IEEE Fellow。现任中国电力科学研究院名誉院长、中国电机工程学会常务理事、中国电工技术学会常务理事。



长期从事电力系统分析和计算方法的研究。20世纪70年代开始研究现代电力系统分析的数学模型、计算方法和工程应用。主持开发了我国第一套“电力系统分析综合程序”(PSASP)大型软件,在全国电力系统广泛应用。参加或主持中国多项大型超高压输电系统工程关键技术研究,在中国第一条330kV超高压输电线路、第一条±500kV高压输电线路等工程中提出并采用新的分析模型、计算方法和关键技术。

从20世纪90年代开始,结合国家自然科学基金重点项目“超高压输电系统可控串补的研究”,从事灵活交流输电系统和电力电子技术应用于电力系统的研究。在国家“973”项目课题“以高速PC机网络为硬件支撑的多机电力系统实时仿真系统关键技术研究”的支持下,开展了电力系统实时数字仿真关键技术研究。2004—2009年,作为首席科学家主持国家重点基础研究发展计划(“973”计划)“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”项目。

近年承担中国科学院和中国工程院的咨询研究项目,就国家和省区能源和电力发展、未来电网和电网技术的预测和对策等进行战略研究,提出供国家制定相关政策的参考意见和建议。2010年提出“三代电网”的概念,为适应未来能源电力发展变化的电网转型提供理论依据。

1985年、2008年和2009年分别获得国家科技进步一等奖,2008年获得 IEEE PES Nari Hingorani FACTS 奖,2009年获得何梁何利科学与技术进步奖,2012年获得国家科技进步特等奖。

主编参编专著7部,发表论文160余篇。其中主编《电力百科全书》电力系统卷、《中国电气工程大典》电力系统工程卷。参编《电力系统计算》一书,获1981年国家优秀科技图书一等奖。



田芳 教授级高级工程师, IEEE、CSEE 高级会员。2001 年 12 月毕业于中国电力科学研究院, 获得博士学位, 同年进入中国电力科学研究院工作, 主要从事电力系统仿真、分析与控制研究。参与了国家自然科学基金、“973”计划、“863”计划和国家电网公司重大科研项目: “超高压输电系统中灵活交流输电(可控串补)技术”, “大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统”, “直流输电系统全数字实时仿真系统的开发”, “提升电网安全稳定和运行效率的柔性控制技术”, “电力系统全数字实时仿真装置的研制”, “国家电网仿真中心建设”等, 主持完成了国家科技支撑计划项目课题和国家电网公司重大科研项目: “大电网安全监测、预警与防御体系研究”, “电力系统在线仿真分析、决策及控制关键技术研究”等。合作出版专著 1 部, 发表论文 30 余篇, 获国家科技进步一等奖 1 项, 省部级科技进步奖 6 项, 中国专利金奖 1 项、优秀奖 1 项, 授权发明专利 8 项。

李亚楼 教授级高级工程师, 2003 年毕业于中国电力科学研究院, 获得博士学位, 同年进入中国电力科学研究院工作。现任中国电力科学研究院电力系统研究所总工程师。主要从事电力系统仿真分析方法研究和软件开发。作为子课题负责人参与“973”项目、“863”项目、自然科学基金项目, 主持直流电网基础理论研究、电力系统云仿真技术研究及系统开发等项目。发表论文 30 余篇, 出版专著一部。获国家科技进步一等奖 1 项, 省部级科技进步奖 4 项。



郑超 高级工程师, 中国电机工程学会高级会员。2006 年毕业于中国电力科学研究院, 获得博士学位, 同年进入中国电力科学研究院工作。主要从事电力系统稳定与控制、新能源并网及 FACTS 应用研究。参与和负责了国家高技术研究发展计划(“863”计划)“适应高渗透率间歇性电源接入电网的综合规划方法研究”和国家电网公司重大科技专项“交直流、多直流安全稳定紧急控制技术”等项目。发表论文 40 余篇, 获省部级科技进步奖 5 项。

《现代电力系统丛书》编委会(第三届)

主 编：卢 强

副 主 编：周孝信 韩祯祥 陈寿孙

编 委：(按姓氏笔画排序)

王祥珩	甘德强	卢 强	余贻鑫	张伯明
杨奇逊	陈 陈	陈寿孙	周孝信	贺仁睦
赵争鸣	倪以信	夏道止	徐 政	顾国彪
梁恩忠	程时杰	韩英铎	韩祯祥	

责任编辑：张占奎

丛 书 序

当我剪烛为这篇短序时,竟几次因思绪万千未开头便搁笔。出版“现代电力系统丛书”是我的导师高景德院士于1990年开始构思、策划的。作为一位科学家和教育家,高先生十分重视“丛书”对提高我国电力系统学术水平和高层次人才培养方面的重要作用。先生认为:各领域的科技专著应是那个领域最前沿和最高水平科技成果的结晶,是培育一代代科技精英和先锋人物的沃野和圣堂。先生对我说:优秀著作是人类先进思想和成果最重要的载体,正是它们构成了人类文化、科技发展万世不竭的长河。导师的教导音犹在耳。

1997年因这位清华大学老校长烛炬耗尽致使“丛书”出版工作一度停顿。三年后,清华大学出版社重新启动了“丛书”的出版工作,于2002年组成了第二届编委会,继擎着高景德院士亲手点燃的火炬前行。

自1992年以高先生为主编的第一届编委会成立起,至2006年止,我国的电力装机提高了2.7倍,年均以将近20%的速度增长。这在世界各国电力工业发展史上是绝无仅有的。此刻我想到,高先生的在天之灵会问我们这些晚辈:我国电力高科技含量的增长是否也与我国的电力总量的增长相匹配?这一问题是要我国电力科技工作者用毕生不懈的努力来回答的。

时光如梭,2002年的第二届编委会又到了换届之时,感谢数位资深编委出色完成了他们的职责。时至2007年5月,第三届编委会在清华大学出版社主持下成立。编委共19名,包括四位中国科学院院士,四位中国工程院院士,其他皆为处于我国电力系统顶尖之列的精英学者,其中不乏新充实的优秀中青年学者。保证了“丛书”的火炬不仅能得以传承,而且会越燃越旺。本届编委会进一步明确“丛书”涵盖的领域为:电力系统建模、分析、控制,以安全稳定经济运行为主;新能源并网发电,如风力发电、太阳能发电等;分布式能源电力系统等内容。

至今,该“丛书”系列已出版专著约十本,预计今明两年将至少再出版六本。应该说已出版的该系列专著已经引领几代青年学者、科技工作者走上了科技大道。近年来,我们在“电力系统灾变防治和经济运行重大科学问题”方面得到国家首期“973”项目资助和支持,并取得了一些突破性进展;电力领域第二期“973”项目“提高超大规模输电系统的运行可靠性研究”从2004年推着前浪前进,成果丰硕。所取得的这些前沿成果将在“丛书”中得到充分的体现。有些成果在世界上未有先例。

因此,我们相信中国电力科学会引领世界电力科技的发展;相信“丛书”系列还将继续引领和帮助一代代电力界科技工作者开辟康庄之途。

按照高景德院士的教育思想,“丛书”的作用主要不是去“灌满一桶桶的水”,而是去“点燃一把把的火”。

导师英名长存。感谢清华大学出版社使“丛书”之炬得以传承。

相信中国电力科技能成为世界电力科技引路之光。

卢 强

2007年7月于清华园

前 言

电力系统是由发电、输配电和用电三部分组成的大型人造系统。在电力系统为人类带来巨大效益的同时,还时刻面临来自外部和内部故障对安全运行的威胁。若不能及时采取正确的处理措施,就会导致局部或大面积的停电事故,造成巨大的经济损失和社会影响。到 2013 年年底我国已建成装机容量超过 12 亿千瓦、面积覆盖全国的互联电力系统。确保电力系统运行安全、避免大范围停电事故的发生和蔓延,是维护国家能源供应安全的重要任务。通过对大规模电力系统的实时和超实时仿真,掌握运行中电网遭受故障条件下的动态特性,以及对各类安全稳定措施和控制保护设备进行实时验证考核,是达到避免大停电事故、保障电力系统安全运行的重要举措。

电力系统实时仿真技术经历了 20 世纪 50、60 年代出现的物理实时仿真(又称为动态模拟),70、80 年代出现的数字-物理混合实时仿真(又称数模混合式仿真),到 90 年代以来出现的电力系统全数字实时仿真(又称实时数字仿真)的发展过程。全数字实时仿真将电力系统实时仿真技术推向一个新的发展阶段。为满足我国大规模、交直流混合电力系统仿真的要求,电力系统实时数字仿真技术必须要解决下述两大技术难题:大规模互联电网仿真的实时性和大容量电力电子设备与大电网相互影响的仿真精确度。为此,我们于 20 世纪 90 年代后期开始,在国家“973”项目课题“以高速 PC 机网络为硬件支撑的多机电力系统实时仿真系统关键技术研究”的支持下,开展了实时仿真关键技术研究,后来又在国家高技术产业发展计划项目以及国家电力公司重点项目持续支持下,开展了实时仿真装置的研制工作,于 2005 年完成了项目的研发。

从 2005 年至今,全数字实时仿真技术又得到新的发展,在基于 Infiniband 高速网络的实时仿真、高频开断的电力电子开关器件的实时仿真、全数字实时仿真与物理模拟仿真设备的功率连接、全数字实时仿真与 FACTS 控制装置的闭环仿真试验、基于 IEC61850 的数字化变电站闭环试验等技术的研究方面取得进展。与此同时,依托上述项目所研制的电力系统全数字实时仿真装置(ADPSS)已推广应用到全国 30 余家单位,各应用单位结合生产实际需求,开展了交直流互联系统仿真分析,新能源新设备的建模和仿真分析,基于在线数据的仿真分析,连锁故障仿真分析,重大事故分析,继电保护、励磁控制和安稳控制装置闭环试验,HVDC 和

FACTS 控制系统闭环试验,自动电压控制、自动发电控制和广域控制保护系统的闭环试验等应用研究工作。

随着计算机软硬件和网络通信技术的发展,例如,图形处理器(graphic processing unit, GPU)、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)、众核处理器、新一代网络、云计算等,未来实时数字仿真技术将朝着下述方向发展:基于 GPU 和 FPGA 的实时仿真;利用高速通信网络的分布式实时仿真和远程试验;机电暂态-电磁暂态-中长期动态一体化实时仿真;基于超实时仿真的在线控制和云控制等。

为了促进电力系统数字仿真技术的进一步发展、满足应用需要,本书作者遴选了上述研究项目的研究成果,并吸取了部分后续应用研究成果,组成了本书的主要内容。全书共分 7 章。其中第 1、3、4、5 章由田芳撰写,第 2、6 章由李亚楼撰写,第 7 章由郑超撰写,周孝信负责全书统稿和审核。吴中习教授级高工、林集明教授级高工、武守远教授级高工、李若梅教授级高工为科研项目的立项和研究做出了关键贡献,郭剑、宋瑞华、岳程燕、张星、裘微江、康建东、朱旭凯参加了项目的研究和后续应用研究工作。本书撰写过程中得到陈绪江、彭红英的大力协助。在此谨代表本书作者对上述各位所做出的贡献表示衷心的感谢。对江苏省电力试验研究院、山东电力研究院、中电普瑞科技有限公司等单位对后续应用研究工作的支持表示衷心感谢。

电力系统数字仿真新技术不断涌现,作者限于水平,难窥全貌,书中错误和不妥之处在所难免,请读者批评指正。

周孝信

2014 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统仿真	1
1.1.1 系统及系统仿真	1
1.1.2 电力系统实时仿真	2
1.2 电力系统数字仿真及数字仿真方法	3
1.2.1 电力系统数字仿真分类	3
1.2.2 电力系统 3 类动态过程及其数字仿真方法	4
1.2.3 电力系统实时数字仿真装置	6
1.3 电力系统数字仿真技术的新发展	7
1.4 本书的主要内容	12
参考文献	14
第 2 章 机电暂态仿真并行计算的模型与方法	16
2.1 概述	16
2.2 机电暂态仿真计算的数学模型与方法	17
2.2.1 同步发电机模型	18
2.2.2 励磁调节系统模型	25
2.2.3 原动机调速系统模型	30
2.2.4 负荷模型	34
2.2.5 扰动和稳定控制的处理	39
2.2.6 基于梯形隐式积分和交替求解方案的机电暂态仿真过程	43
2.3 机电暂态仿真计算的并行算法	44
2.3.1 电力网络的分割方法	45
2.3.2 线性方程组并行求解方法	53
2.3.3 一种适用于机群并行机的机电暂态实时仿真算法	66
2.4 外接数字模型和物理装置的并行仿真	74
2.4.1 外接数字模型和物理装置仿真方法概述	74
2.4.2 外接用户自定义模型仿真	77
2.4.3 外接 MATLAB 数字模型仿真	77

2.5 机电暂态仿真并行计算算例	81
2.5.1 测试用机群并行机配置	82
2.5.2 并行性能评测指标	82
2.5.3 CEPRI 36 节点系统仿真测试	83
2.5.4 东北、华北和华中联网系统仿真测试	88
2.6 小结	97
参考文献	98
第3章 电磁暂态过程并行计算的模型和方法	101
3.1 概述	101
3.2 电磁暂态仿真计算的基本方法	102
3.2.1 电磁暂态网络计算模型	102
3.2.2 数值积分方法	103
3.2.3 电磁暂态仿真计算流程	104
3.3 电磁暂态计算的电力系统元件数学模型	105
3.3.1 线性集中参数元件模型	105
3.3.2 分布参数线路元件模型	112
3.3.3 同步电机元件模型	121
3.3.4 简单电压源和电流源模型	131
3.3.5 开关元件模型	133
3.3.6 非线性元件模型	138
3.4 电磁暂态仿真计算的并行算法	141
3.4.1 分布参数线路解耦分网并行算法	142
3.4.2 节点分裂分网并行算法	143
3.4.3 线路解耦与节点分裂结合法	147
3.4.4 电磁暂态分网并行算法实现	147
3.4.5 并行计算性能分析	149
3.5 电磁暂态仿真并行计算算例	150
3.5.1 修改后的 IEEE 14 节点系统	150
3.5.2 黑龙江省电力系统	153
3.6 小结	156
参考文献	156
第4章 机电-电磁暂态过程混合并行数字仿真	158
4.1 概述	158
4.2 机电-电磁暂态混合仿真的常用方法	159
4.2.1 迭代式混合仿真方法	159

4.2.2 串行混合仿真方法	159
4.3 机电-电磁暂态混合并行仿真方法	160
4.3.1 数据交换时序	160
4.3.2 接口等值电路	161
4.3.3 数据交换形式	163
4.3.4 混合仿真在机电暂态仿真程序中的实现	164
4.3.5 混合仿真在电磁暂态仿真程序中的实现	164
4.4 机电-电磁暂态混合并行仿真算例	170
4.4.1 单机无穷大系统	170
4.4.2 CEPRI 7 节点系统	172
4.4.3 南方电网交直流混合系统	176
4.5 小结	183
参考文献	183
第 5 章 交直流混合电力系统并行数字仿真	185
5.1 概述	185
5.2 直流输电系统数学模型	185
5.2.1 用于机电暂态仿真的直流输电系统模型	185
5.2.2 用于电磁暂态仿真的直流输电系统模型	190
5.3 常规的交直流混合电力系统仿真方法	205
5.3.1 机电暂态仿真方法	205
5.3.2 电磁暂态仿真方法	206
5.3.3 机电-电磁暂态混合仿真方法	206
5.4 交直流分割并行电磁暂态仿真方法	207
5.5 交直流分割并行电磁暂态仿真算例	213
5.6 小结	214
参考文献	214
第 6 章 电力系统全数字实时仿真装置及其应用	216
6.1 概述	216
6.2 全数字实时仿真装置简介	217
6.3 全数字实时仿真装置硬件系统	220
6.3.1 并行计算机群	220
6.3.2 物理接口箱	223
6.3.3 线性功率放大器	230
6.3.4 终端工作站	231
6.3.5 其他辅助设备	231

6.4	全数字实时仿真装置软件系统	231
6.4.1	机电暂态仿真软件功能	231
6.4.2	电磁暂态仿真软件功能	233
6.4.3	机电-电磁暂态混合仿真功能	233
6.4.4	外接数字模型接口	234
6.4.5	外接物理装置接口	234
6.4.6	分布式计算平台	234
6.4.7	在线数据接口	235
6.5	全数字实时仿真装置与物理装置联合仿真	236
6.5.1	仿真过程中的实时与同步控制	236
6.5.2	与物理控制保护设备联合仿真	238
6.5.3	与一次模拟设备功率连接仿真	241
6.6	全数字实时仿真装置用途	244
6.7	全数字实时仿真装置典型应用	247
6.7.1	物理设备试验研究	248
6.7.2	电网事故模拟分析	267
6.7.3	交直流系统安全稳定运行及控制策略研究	268
6.7.4	电网在线仿真分析	272
6.8	小结	273
	参考文献	274
第7章	VSC-HVDC 输电系统建模与仿真	276
7.1	概述	276
7.1.1	VSC-HVDC 技术原理	277
7.1.2	VSC-HVDC 技术特点	279
7.1.3	VSC-HVDC 应用领域	280
7.1.4	VSC-HVDC 应用现状	281
7.2	VSC-HVDC 稳态建模与潮流计算	282
7.2.1	VSC-HVDC 稳态特性与控制方式	282
7.2.2	VSC-HVDC 交直流潮流交替求解	284
7.2.3	VSC-HVDC 交直流潮流统一迭代求解	290
7.3	VSC-HVDC 暂态建模与动态仿真	294
7.3.1	VSC-HVDC 暂态建模	294
7.3.2	基于用户自定义模型的 VSC-HVDC 动态仿真	297
7.3.3	基于用户程序接口的 VSC-HVDC 动态仿真	300
7.4	VSC-HVDC 等效仿真模型及应用	306

7.4.1 VSC-HVDC 等效仿真模型	306
7.4.2 VSC-HVDC 等效仿真模型有效性分析与验证	308
7.4.3 VSC-HVDC 次同步振荡阻尼特性	309
7.4.4 VSC-HVDC 对串补输电系统中发电机电气 阻尼特性的影响.....	311
7.5 多端 VSC-HVDC 运行特性仿真	314
7.5.1 VSC-HVDC 控制器设计	314
7.5.2 多端 VSC-HVDC 仿真分析	316
7.6 小结	319
参考文献.....	320
附录 A 单机无穷大系统参数	322
A.1 系统参数	322
A.2 潮流结果	323
附录 B CEPRI 7 节点系统参数	324
B.1 交流系统参数	324
B.2 直流线路、换流变压器及交流滤波器参数	325
B.3 直流控制器参数	326
B.4 潮流结果	326
附录 C First benchmark HVDC model 系统参数	327
C.1 交流系统参数	327
C.2 直流线路及换流变压器参数	328
C.3 直流控制器参数	328
附录 D IEEE 14 节点系统参数	329
D.1 系统参数	329
D.2 潮流结果	331
附录 E CEPRI 36 节点系统参数	332
E.1 系统单线图	332
E.2 系统参数	332
E.3 潮流结果	339
附录 F 双端 VSC-HVDC 潮流计算雅可比矩阵及其元素表达式	340
索引	343

第1章 绪 论

1.1 电力系统仿真

1.1.1 系统及系统仿真

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体。系统仿真以系统理论、控制理论、相似原理和信息技术为基础,以计算机和/或专用物理设备为工具,借助系统模型对实际或设想的系统进行动态实验研究的理论和方法^[1]。

系统仿真在理论上体现了实验思考的方法论,用它可以探索高技术领域和复杂系统深层次的运动机理和规律性,给出人们直观逻辑推理不能预见的系统动态特征,具有科学的先验性。系统仿真是继理论分析和实物试验之后,认识客观世界规律性的有力手段,它可以把复杂系统的运行放在实验室中进行,具有良好的可控性、无破坏性、可复现性和经济性,在辅助决策、计划优化、管理调度、方案比较及辅助设计等方面发挥着重要作用^[2]。

系统仿真经历了从物理模型动态模拟到数学模型数字仿真的多个阶段。最初,人们在相似理论的指导下设计并构成物理模型系统。通过在物理模型系统上做实验来代替在实际系统上的试验,这就是动态模拟。例如,电力系统动态模拟就是一种用于研究电力系统动态特性的物理模型系统。它把电力系统的各个部分,如同步发电机、变压器、输电线路、负荷等按照相似条件设计、建造并组成一个电力系统模型,用这种模型代替实际电力系统进行各种正常与故障状态的试验和研究^[2]。电力系统动态模拟的优点是可以较为真实地反映被研究系统的全动态过程;包括同一系统内不同时间常数的动态过程;局限性在于仿真的规模受实验室设备和场地限制,试验工作量大,效率较低,而且每一次不同类型的试验都要重新进行电气接线,费力耗时。

随着实际系统的发展,系统的规模和复杂程度日益增大,采用物理模型的动态模拟方法受到很大限制。与此同时,数字计算机和数值计算技术飞速发展,数字计算机的性价比不断提高,出现了用数字模型代替物理模型的新型模拟系统,建立数学模型并在数字计算机上做实验的过程称为系统数字仿真。例如,电力系统数字

仿真就是一种用于研究电力系统动态特性的数字模型系统。它通过建立电力系统各元件的数学模型,根据系统的具体结构组成全系统的数学模型,在数字计算机上,采用数值计算方法来模拟电力系统的稳态、暂态和动态的过程,并在此基础上进行各种正常与故障状态的试验和研究。

数字仿真的基本步骤为:①建立数学模型;②确定数值计算方法和建立数字仿真模型;③数字仿真试验和分析。建立数学模型的任务,是根据仿真试验的目的和原型与模型之间的数学相似原则,确定描述系统特性的数学表达式;确定数值计算方法和建立数字仿真模型的任务,是针对不同形式的数学模型选择并设计相应的数值计算方法,编制计算程序;数字仿真试验和分析的任务,是在数字计算机上模拟实际系统完成各种试验和研究项目,并对结果进行分析和评价^[3]。数字仿真不受被研究系统规模和结构复杂性的限制,可以保证被研究和试验系统的安全性,使用灵活,扩展方便,成本相对低廉,可以用于对未来系统发展的预测,近年来在电力系统中得到较为广泛的应用。

1.1.2 电力系统实时仿真

电力系统实时仿真指的是仿真过程与实际系统的运行过程保持一致的一种仿真形式,一般用于电力系统自动控制和保护系统的设计,以及投产前的实验和检测,也可用于电力系统专业的教学和培训以及相关科研工作。

按照仿真工具和发展阶段的不同,电力系统实时仿真一般分为物理实时仿真、数字-物理混合实时仿真和全数字实时仿真三大类。

20世纪五六十年代出现的物理实时仿真(又称为动态模拟)基于相似理论,将电力系统实际元件,如发电机、调压器、调速器、电动机、变压器、输电线等,用参数成倍数缩小的真实物理元件模拟,根据实际元件的连接关系连接物理模拟元件,组成模拟的电力系统。其中输电线路由于真实物理元件比例缩小建模的困难,采用数学模型和参数而用物理元件加以实现的建模方法。物理实时仿真的优点是直观明了、物理意义明确。其缺点是设备昂贵,占地面积大,可模拟的电力系统规模受制于实验室设备和场地限制,难以模拟大规模电力系统,可扩展性和兼容性差;另外试验工作量大,效率较低,当所仿真的网络条件发生变化时,需要重新接线,花费大量时间和人力。

20世纪七八十年代出现的数字-物理混合实时仿真(又称数模混合式仿真),采用的是数字仿真元件、电力网络的数学-物理模型和基于相似理论的物理模型。发展这种实时仿真技术的主要原因在于当时计算机技术水平还不能实现规模较大电力系统的实时数字仿真,特别是电力网络暂态过程的求解达不到实时的要求。因此,在这一类仿真中,通常采用的仿真方式是:输电网络采用数学模型的物理建模,即所谓数学-物理模型,其仿真过程完全与实际物理过程同步,而发电机及其控