

现代电力系统丛书



智能电力系统与智能电网

卢强 何光宇 陈颖 张雪敏 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书



智能电力系统与智能电网

卢强 何光宇 陈颖 张雪敏 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从概念、架构、理论基础、关键技术和工程实践等方面对智能电力系统以及它与智能电网(smart grid)的关系进行了较为系统的阐述。书中主要内容包括:智能电力系统的定义;电力混成控制论概要;智能电力系统的基础设施和平台;智能电力系统运行的标准指标体系;智能能量管理系统(SEMS)及其关键技术;智能电网概念和技术。

本书内容丰富且具有启发性,适用于从事智能电力系统和智能电网研究的科技人员参考学习,也可以作为参考书应用于电力系统专业研究生的教学和辅导。书中所介绍的理论和方法为我国智能电网技术的发展提供了有力的支撑,所提出的智能电力设备、智能电力系统和智能调度等技术方案可作为工程技术人员参考的范本。

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

智能电力系统与智能电网 / 卢强,何光宇,陈颖,张雪敏著. —北京:清华大学出版社,2013
(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-23857-7

I. ①智… II. ①卢… ②何… ③陈… ④张… III. ①智能控制—电力系统 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 181201 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:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:12.75 插 页:1 字 数:252 千字

版 次:2013 年 3 月第 1 版

印 次:2013 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~1000

定 价:49.00 元(精)

产品编号:029583-01

作者简介



卢强 1936年5月19日出生于安徽省无为县。1959年和1964年清华大学电机系本科和研究生毕业。1985年至1986年任美国 Colorado State University 访问教授,讲授研究生课并从事科研工作。1988年1月起任清华大学教授,1991年当选中科院学部委员(后改称为中国科学院院士)。1993年至1995年任日本 KIT 客座教授,讲授研究生课程并从事科研工作。2003年当选为 IEEE Fellow。2006年当选为瑞典皇家工程科学院外籍院士。现任清华大学电力系统国家重点实验室学术委员会主任、中国电机工程学会常务理事等。

卢强教授长期从事电力系统稳定分析与控制、电网安全以及太阳能发电综合应用系统和“风-储”协同自律控制等领域的研究。发表论文 100 多篇,出版专著 3 部(其中 *Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics* 由原 Kluwer Academic Publishers 出版)。

曾获国家优秀科技图书一等奖、国家自然科学基金二等奖(2次)、国家科技进步三等奖、教育部自然科学一等奖、国家优秀教学成果特等奖和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)先进个人等。

曾任国家重点基础研究发展计划(“973”计划)“电力大系统灾变防治”首席科学家。先后主持完成国家自然科学基金重点项目“电力系统非线性鲁棒稳定控制”和“电力系统智能控制”,国家发改委高技术示范工程“输配电系统混成控制系统”,国家重大科技攻关计划“三峡发电机组非线性励磁”和国家电网公司重点科技项目“大型水轮发电机组非线性鲁棒调速控制装置”等十余项重大科研项目。目前正主持国防“973”中的两项子专题、东北电网混成电压控制、上海电网 AEMS 和深圳电网灾变防治等多项重大工程项目。



何光宇 教授,博士生导师。1999年6月毕业于清华大学电机系,获博士学位,同年留校任教。2003年至2004年在法国IDEA(Inventer la Distribution Electrique de l'Avenir)研究所作访问学者,从事分布式发电与虚拟电厂的建模及优化方面的研究。

研究方向主要集中在智能电力系统、电力系统安全与经济运行、优化理论在电力系统中应用等方面。近年来开展的主要科研项目包括:Advanced EMS与混成自动控制系统、数字南方电网规划、以先进状态估计为内核数据共享技术研究、智能电网关键技术研究、智能电网长中期能源优化调度系统研究、多目标在线运行分析与辅助决策系统研究、无功电压多层多区协调控制系统开发、短期与超短期负荷预测系统研究与开发等。获省部级科技进步奖五项,以一二作者在国际会议及国内外高水平学术期刊上发表论文90余篇,以第一申请人获得国家发明专利五项。



陈颖 副教授。2006年6月毕业于清华大学电机系,获博士学位,同年留校任教。主要从事电力系统仿真和优化控制研究,独立承担国家自然科学基金研究,并参与东北、上海、深圳的混成自动闭环控制工程项目。

在电力系统并行和分布式仿真领域发表学术论文30余篇,其中SCI收录5篇,EI收录20余篇,曾获军队科技进步一等奖。



张雪敏 副教授。2006年毕业于清华大学电机系,获博士学位,同年留校任教。主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。2002年赴英国Brunel大学进行短期访问学习。参与和负责了国家自然科学基金“影响超大规模电力系统安全性的动态行为与特征”和“独立电力系统输入状态稳定性分析的基础研究”等。此外,作为主要参与者,完成了“四川电网灾难性事故及防治对策研究”、“东北电网无功电压多层多区协调控制系统开发”等工程项目的研究和开发调试工作。

《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,而且会愈燃愈旺。本次编委会进一步明确“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部。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

序

这是一本向读者阐述电力大系统本质上是一部机器人(广域机器人)以及如何使其更好、更乖巧地为人类工作的书。

是的,大约在 10 年前,我忽地意识到既然人类的文明创造了一个造福于自身的、物理的、动力学的电力系统,就该再造一个能够描述、驾驭和管控它的、使其变得更令人满意的数字电力系统(digital power systems, DPS)。一种责任感促使我在一些会上宣示了这一想法,并在几位朋友的劝说下在一种“影响因子”几乎为零的杂志上发表了一篇不成文的“论文”。

其实,我提出要构建 DPS 并非出于什么科学的思辨,而是我观察到人类有一种天性,即要不断地改进他(人类)不满意的而又对其生活很有影响的事物。电力系统便首当其冲。因此,那时候我确认,即使不是我,在不久的将来定会有人提出类似的命题和想法,构建 DPS 的热潮一定会很快漫卷全球。与其等待西方,还不如在东方及时建立一个清华学派以行身体力行之道。在获国家科技部首批“973 项目”支持后,工作便正式启动了。

迈步时,向自己提出的第一个问题便是:为何要构建 DPS? 回答是要把中国物理电力系统“培育”“教化”成一个“三好系统”,即安全好、品质好和效率好。

第二个问题自然是“How”? 说来见笑,大约是因为分别于 1973—1983 年和 1983—1993 年期间我从数学两大分支——古典变分法和微分几何学——的应用中不无侥幸地分别得到了发电机组的线性和非线性最优控制解析解中尝到了“甜头”的缘故吧,这次仍想继续借助纯分析数学来获得整个电力大系统三大类指标最优解的一个统一的、漂亮的表达

式。昏昏然地花费了两年光阴方醒,对于复杂电力大系统这真是一条死得不能再死的死路。如果想把该问题抽象成为一个具有非线性微分方程和代数方程组约束的变分问题,那么单就非线性微分方程(DE)少说也有七七四万九千阶。不是吗?一台发电机组以七阶 DE 描述,而一个电力大系统中的大中型发电机组又何止 7000 台?!更何况还有十几万个节点的不等式约束。正在花费宝贵时间看我这篇序的尊敬的读者们都知晓,在应用拉格朗日方法(Lagrange's method)解决条件变分问题时,那些被代入指标泛函表达式中的都必须是一些等于零的函数式(方程式的左端),非零莫入;如果还有海量不等式约束的“宾客”候在“厅”外,那就只好摇头作罢了。

“Что делать?”(俄)“怎么办^①?”首先需要的是解决该问题的方法论。无方法论则无从下手。方法论啊,你在哪里?“如果说我看得比别人更远,那是因为我站在了巨人的肩上”。伊·牛顿是这样说的,也是这样做的。牛顿可,但吾辈却不可。何哉?因为牛顿本人就是一位巨人。若把牛顿比作一颗硕大的珍珠,那我只是海滩中的一粒细沙。或许连这样去“比”的本身就是一种“罪过”。这里透个秘密,这个清华学派并非从“巨人”们那里而是从儿童们那里得到有关方法论的启发的。儿童常常把人简单地分为两类,即好人和坏人。有了,为何不将电力系统全状态空间切分为满意的和不满意的两类呢?为严格起见,将那些不十分满意的状态皆归入“不满意”状态空间。这样,一个电力大系统在 t 时刻的全状态空间就被区分为足够满意的被称作趋优状态空间 $\Omega(X_s(t))$ 和不满意的被称作“事件空间 $\Omega(E(t))$ ”两类了。问题至此如拨云见日。一个电力大系统(自特高电压级至最低电压级)的多指标(multi-index)自趋优控制方法论可归表为十二字“箴言”,其必曰“事件触发控制,控制消除事件”。方法论解决了,该学派的年轻科技精英们就可“出手”,有用武之地了。

大约是因为半殖民地太久了的缘故吧,往往一个“中国佬”的创新思维需等某位西方名人以直接的或以“所见略同”的方式加以肯定方能受到重视(应该说,近些年来这种现象大有改观)。这位西方名人出现了,他就是美国总统奥巴马先生。在演说中他不止一次提到了“smart grid”,并将其视为带动美国经济发展提供更多就业机会的引擎之一。于是掀起了打建“智能电网”的世界性热潮。我们问“智能”主要靠什么技术来支撑?答:IT。当您精细解剖 IT 时,您得到的只有两个神奇的数字 0 和 1,此外,别无它物。我不止一次地问自己,这难道就是在量子信息科学技术(QIST)时代到来前(在量子计算科学技术中并不一定采用二进制,而是多进制,很可能来一个否定之否定又回到十进制也未可知)天赠给人的一种珍贵的礼物吗?是天人合一的一个 case 吗?闲话少说,有了现代的 IT(强调一句,包括现代计算机科学),整个电力大系统,大到覆盖近千万平方公里的国土,都可以被控制得如同一部聪慧的机器人一般。电力大系统可以在你我手中变成一部聪慧、乖巧的机器人,这并非科幻而是现实。但它不是一般体势上的机器人,而是一部广域机器人,即智能广域机器人(smarter wide

① 列宁写过一本名著就叫“Что делать”,这里借用。

area robot, S-WAR)。要构建 S-WAR 必须实现更具智能的电力调度自动化系统——“smarter EMS”,而这必须在现代 IT 支持下方可实现。于是我们又不偏不倚地回到 0 和 1 这两个简单而又奇妙的数字,这是说遵循这条铁的逻辑链,我们又回到清华学派十年前提出的“数字电力系统”这个命题。

现在的时间是 2012 年 9 月 18 日 16 点整,在此借本书“序”宣布:在中国一个以自上而下与自下而上相结合的方式创建更智能的电力系统和更智能的电网(smarter power systems and smarter grids)的时期已经到来。如果一切顺利,如果少走弯路,10—15 年后的今天,中国将以这项伟大工程的独创的成就展现于世。

“序”不宜过长,只能点到为止。在此我必须说,在这本书的封面上只出现 4 位作者的名字,其实若将对此专题有贡献的研发和实施者们的名字都写上,少说也有 30 人。他(她)们都是些年轻的科技精英,名为我的学生(过去的和现在的),在 IT 领域中实为我的先生。我应对他(她)们真诚地道谢。此外,本书 9.6.3 节是请 IBM(中国)创新·优化中心董进博士作修正和补充的;在 smarter-EMS 中还在得到允许的条件下,使用了广西大学韦化教授的最优潮流(OPF)程序的知识产权,在此一并致以谢意。并希望今后能与有关科技团队,进行实质性的合作。让我们共同研造这个史无前例的 S-WAR 吧!

我还必须要深切地感谢国家电网公司、南方电网公司和陕西地方电力(集团)公司的领导。由于他们的远见卓识、由于有了他们的大力支持,使我们可以在东北电力、上海电力和福建电网以及在深圳市调和海南省网以及陕西地方电网实施示范工程,否则,这一切一切的构思、方法论、新理论和新方法岂不都成为纸上之兵、空中之阁了吗?!所以说上述领导们的支持是有决定意义的。

饮水思源,若无中国国家自然科学基金委(NSFC)长期不断的资助,没有科技部“973 项目”,没有发改委重大示范工程项目的支持(还应加上日本文部省和微软公司的资助),恐怕我们这个创新团队早已星散,只剩下我一人“茕茕孑立”了吧。

越想越多,有多少人我还应感谢啊!但不可能一一列名。好在,即使我不列出,他们和我的心里都是有数的。

卢 强

2012 年 9 月 18 日

于清华园

前言

随着通信技术、测量技术、计算机科学与技术和控制理论与技术的发展,以及新的一次与二次设备(如 FACTS 设备、非线性优化镇定器 NO-PSS、分散的无功补偿器 D-STATCOM、滤波器和 PMUs 等)在电力系统中的广泛使用,人们对当代和未来电力系统也有了更高要求和期望。国内外学者先后提出了数字电力系统^[1]、智能电力系统^[2-4]、智能调度控制中心、先进调度自动化系统(AEMS)和智能电网(smart grid)、微网(microgrid)等一系列概念来描述未来电力系统和电网的可能形态。

这些概念的提出已有时日,但对于数字电力系统与智能电力系统和智能电网之间的关系,它们的实质和定义,建设目的,以及怎样去实现等问题仍不十分清晰。本书提出智能电力系统是数字电力系统的初始阶段,是数字电力系统总概念中的一个子概念;并提出智能电力系统是具有多指标自趋优运行能力的电力系统。具有这种能力的电力系统自然是聪慧的(smart)、智能的(intelligent)。全书从概念、架构、理论基础、组成和工程实践等方面对智能电力系统以及其与奥巴马总统不止一次提出的智能电网(smart grid)的关系进行了较为系统的阐述。

第1章旨在阐明智能电力系统概念,阐述其主要结构及建设意义,同时对国内外相关研究工作做了简要介绍,希望就未来电力系统发展可能形态对读者有一个简要的交代。

第2章给出了实现上述目标所依托的基本理论,即电力混成控制论。针对如电力系统这一类超高维的非线性系统,现有的理论方法和技术皆难以支撑多指标趋优化控制的实现。本书作者的研究结果使这一长期苦苦在昏暗中探求的问题豁然开朗。智能电力系统需要采用基于事件驱动的多指标趋优化控制的理论和方法,以消除不满意状态为控制目的,让电力系统始终运行在足够满意状态下,从而实现系统的多指标自趋优运行。

故可认为电力混成控制理论是使建设智能电力系统至少是智能调度目标得以实现的理论基础。

第3章及第4章介绍了智能电力系统基础设施和基础支撑平台。第3章主要介绍智能电力系统工程实现的基础设施,即数字化变电站、数字化发电厂和数字化线路等。它们一方面为全局共享提供数据来源,另一方面则为协同调控提供手段,是智能电力系统中不可或缺的“上行”和“下达”的构件。第4章介绍了基础通信平台和数据共享平台。基础通信平台是实现数据全局共享的物理传输平台,介绍了基础通信平台需求、实现所用架构及关键技术。数据共享平台是实现数据全局共享的逻辑传输平台,由通用数据访问接口、公用数据模型和数据交换单元构成。其中,通用数据访问接口实现了数据访问方式与应用之间的独立性;公用数据模型实现了数据表示与应用的独立性;数据交换平台实现了数据处理和数据存储位置的独立性,从而达成了数据结构的一致性,形成了数据共享机制,以实现业务的无缝连接。

第5~7章介绍了实现智能电力系统所需关键技术。其中,第5章介绍了智能电力系统运行标准指标体系,所建立的这一标准指标体系用于评估电力系统是否处于多指标趋优运行状态。第6章介绍了事件分析与处理中的核心技术,即高可信度的状态估计技术和高收敛性的最优潮流技术。第7章介绍了智能电力系统可视化技术,这是机器智能与运行人员智能对接的窗口。

第8章向读者剖析了智能电力系统的工程实现亦即智能电力调度自动化系统(smarter EMS, SEMS)。其中,第8章介绍了SEMS的概念、组成、关键算法和实现方式。SEMS是世间最早诞生的一个智能电力系统的婴儿。为了不割断历史,这个婴儿还是沿用了他的“祖辈”称谓——EMS。他现在虽然还处于他的孩提时代,但他必将成长为受中国和世界所有电力系统欢迎和乐意接纳的宾客,并最终成为主人。SEMS基于电力混成控制理论,可实现系统的多目标自趋优化运行。

第9章介绍了目前学术界和工业界共同关注的一些智能电网相关的定义、内容和新技术,包括分布式能源技术、大储量长寿命储能技术、电网与用户互动新技术和配电网运行控制,特别是网络重构(自愈)新技术等。这些新技术的提出和发展丰富了配电网和用户侧的调控手段,提高了电力系统供电可靠性经济性和质量,增强了用户在电力供应中的交互能力,促进智能电力系统的发展。

总的来说,本书从理论与实战相结合的高度对电力系统的发展趋势尽可能科学地进行预估,提出了整体的解决思路、理论和方法,明示出电力系统调度自动化领域科技创新的方向,希望能为智能电力系统以及智能电网在我国的建设提供一条可行的途径。

本书是作者近年来在国家“973”项目、国家自然科学基金项目、国网公司和南网公司资助下从事智能电力系统及智能电网方面研究的阶段小结。

智能电力系统和智能电网是一门新兴的学科和工程实践领域,它的发展需要的是全国乃至世界有关学者和工程技术专家们的共同努力、创新和不懈的实践。

作者

2012年12月

于清华园

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 数字电力系统概念的回顾	1
1.2 智能电力系统定义	2
1.2.1 智能电力系统与智能广域机器人	2
1.2.2 SEMS 与智能电力系统在中国	3
1.3 智能电力系统建设意义	4
1.3.1 灾变防治能力根本性提高	4
1.3.2 经济运行指标和电能质量的显著改善	5
1.4 国外研究现状	6
1.4.1 IECSA 项目	6
1.4.2 电力系统无缝的通信架构	7
1.4.3 PJM 先进控制中心	8
1.4.4 IBM 智能公用网络	8
1.4.5 高级配电自动化系统	9
1.5 小结	9
 第 2 章 电力混成控制论概要	11
2.1 引言	11
2.2 若干基本概念	11
2.3 状态空间的两分法则	14
2.4 趋优状态空间	15
2.5 $\mathcal{E}$ 变换与 $\mathcal{C}$ 变换	17
2.6 二级变换的几何解释	18
2.7 事件启动控制,控制消除事件	18

2.8	时间基与事件基	19
2.9	电力混成控制系统——智能电力调度自动化系统结构	20
2.9.1	电力混成控制系统的数据源和数学模型	20
2.9.2	SEMS 结构剖析	21
2.10	小结	25
第3章	智能电力系统的基础设施	27
3.1	引言	27
3.2	数字化变电站	27
3.2.1	数字化变电站的定义	27
3.2.2	数字化变电站建设基本内容	28
3.3	数字化发电厂	34
3.3.1	数字化发电厂定义	34
3.3.2	数字化发电厂建设基本内容	35
3.4	数字化线路	38
3.4.1	数字化线路的定义	38
3.4.2	数字化线路建设的基本内容	38
3.5	小结	45
第4章	智能电力系统的基础平台	46
4.1	引言	46
4.2	基础通信平台	46
4.2.1	基础通信平台的需求	46
4.2.2	基础通信平台的架构与技术	50
4.3	数据共享平台	56
4.3.1	数据共享平台的需求	56
4.3.2	数据共享平台的架构与技术	57
4.3.3	以先进状态估计为内核的实时数据共享	61
4.4	小结	61
第5章	智能电力系统运行标准指标体系	63
5.1	引言	63
5.2	标准指标系的建立	64
5.2.1	智能电力系统的核心需求	64
5.2.2	标准指标系的构建	65
5.2.3	标准指标系的构建原则	66

5.3	安全性指标	68
5.3.1	电压安全域最短半径及其计算方法	69
5.3.2	小干扰安全域最短半径及其计算方法	72
5.3.3	暂态安全域最短半径及其计算方法	74
5.3.4	安全性指标计算算例	76
5.4	互联电力系统控制性能指标	79
5.4.1	互联电网有功控制性能指标	79
5.4.2	互联电网无功控制性能研究	82
5.5	小结	93
第6章	事件分析与处理技术	94
6.1	引言	94
6.2	先进状态估计算法	95
6.2.1	测量不确定度	96
6.2.2	先进状态估计主要思想	97
6.2.3	先进状态估计方法介绍	98
6.2.4	先进状态估计方法特点	101
6.2.5	算例	101
6.3	基于约束变换技术的最优潮流求解算法	103
6.3.1	OPF 模型	103
6.3.2	算法步骤	106
6.3.3	算例分析	107
6.4	小结	110
第7章	智能电力系统可视化	111
7.1	引言	111
7.2	智能电力系统可视化内容	112
7.2.1	运行状态可视化	112
7.2.2	从状态可视化到监控可视化	114
7.3	拓扑图形自生成	116
7.3.1	基本思想	116
7.3.2	单线图自生成	117
7.3.3	厂站主接线图自生成	120
7.4	快速图形渲染算法	122
7.4.1	空间插值算法	123
7.4.2	网格合并法	124

7.4.3	应用实例	125
7.5	小结	127
第8章	智能能量管理系统	129
8.1	引言	129
8.2	SEMS 的含义与特征	129
8.2.1	SEMS 的含义	129
8.2.2	SEMS 的特征	130
8.2.3	SEMS 与 EMS	131
8.3	SEMS 组成	131
8.3.1	事件分析系统	132
8.3.2	事件处理系统	133
8.3.3	调度员决策系统	134
8.4	SEMS 中事件分析模型	135
8.4.1	安全稳定类事件判断	135
8.4.2	电能质量类事件判断	136
8.4.3	经济运行类事件判断	136
8.5	SEMS 中事件处理模型	136
8.5.1	安全稳定类事件处理	136
8.5.2	电能质量类事件处理	138
8.5.3	经济运行类事件处理	138
8.6	SEMS 中可调控资源	139
8.6.1	按控制所利用的信息分类	140
8.6.2	按控制响应时间分类	141
8.6.3	按所控制的电网运行状态分类	141
8.7	SEMS 的分层分级架构	141
8.8	小结	142
第9章	智能电网	143
9.1	引言	143
9.2	智能电网定义	144
9.3	改善观念,建设现代化配电网	145
9.4	让负荷成为“调峰”的主体	146
9.5	智能电网的双侧能量管理系统	147
9.5.1	用户智能调度自动化系统(U-SEMS)	147
9.5.2	配电网智能调度自动化系统(D-SEMS)	148