

现代电力系统丛书



# 现代电力系统控制与辨识

鞠平 编著

清华大学出版社

现代电力系统丛书



# 现代电力系统控制与辨识

鞠平 编著

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

自动控制是电力系统安全经济运行的重要保障,也是反映电力系统科学技术水平的重要标志。

本书针对现代电力系统,介绍其实际控制系统、优化控制理论和参数辨识方法,内容分为三篇。第1篇为电力控制系统,介绍现代电力系统的能量管理系统(EMS)及其三大控制系统,即自动安全稳定控制(ASC)、自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC)。第2篇为电力系统的优化控制,介绍电力系统的线性最优控制和非线性优化控制理论与方法。第3篇为电力系统的参数辨识方法,介绍电力系统辨识方法及其在励磁系统中的应用。

本书具有如下特色:(1)既注重理论又面向实际。先介绍现代电力系统生产实际中的三大自动控制系统,然后介绍相应的控制理论与方法。每个理论方法之后,都有算例或实例。(2)既注重经典又面向前沿。首先保证必需的基本知识,同时注重介绍一些前沿问题及其方法。(3)既注重广度又强调深度。内容覆盖了现代电力系统控制的主要方面,而以往专著都是单独写其中一部分。

本书适合作为研究生相关课程的主教材,也适合作为本科生相关课程的参考书,同时可供工程技术和研究人员参考。

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

现代电力系统控制与辨识/鞠平编著. --北京:清华大学出版社,2015

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-38468-7

I. ①现… II. ①鞠… III. ①电力系统—自动控制 IV. ①TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第260749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

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:河北新华第一印刷有限责任公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:14.75 插 页:1 字 数:291千字

版 次:2015年1月第1版

印 次:2015年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:58.00元

产品编号:052092-01

## 作者简介



鞠平,男,1962年7月生,江苏靖江人。德国洪堡学者、中国国家杰出青年科学基金获得者。1978年9月考入南京工学院(现东南大学)电力系统及其自动化专业,1988年6月在浙江大学电力系统及其自动化专业获得博士学位,其后一直在河海大学任教。期间,1994年1月至1995年10月在德国 Dortmund 大学从事研究工作。现任河海大学教授、博士生导师、副校长,兼任中国电机工程学会电力系统专业委员会副主任委员、江苏省电工技术学会副理事长、《电力系统自动化》等8种杂志编委会的委员或副主任委员等。

作为负责人承担国家杰出青年科学基金项目1项、国家自然科学基金重点项目1项、面上项目2项、省部级基金项目6项、工程项目多项。出版专著3部、教材1部;发表论文160余篇,其中90余篇被SCI和EI收录。获得国家级教学成果二等奖1项,省部级科技进步一等奖1项、二等奖3项。被授予“做出突出贡献的中国博士学位获得者”、“全国留学回国人员成就奖”等荣誉。

自1986年起,长期从事电力系统建模方面的研究。构建了电力系统建模的基本理论,开发了电力系统建模的基本技术,针对电力系统的同步发电机建模、动态等值建模、电力负荷建模以及风力发电建模、微网建模等提出了具体方法。这些理论和方法在13个电网得到应用,取得实效。此外,在电力系统的广域测量技术、概率稳定分析、稳定控制器设计等方面,也取得了一些有特色的成果。

## 《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,从而保证了“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: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为世界电力科技引路之光。

卢 强

2007年7月于清华园

# 序

“现代电力系统丛书”是我的导师高景德院士于1990年开始构思和策划的，1992年成立了以高先生为主编的第一届编委会，时至2007年成立了第三届编委会，进一步明确了丛书涵盖的领域：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。该丛书是电力系统学科领域高水平最新科技成果的结晶，是培育该领域一代科技精英和学术领头人的沃野和圣堂。

现代电力系统的安全稳定经济运行，离不开有效的控制作为支撑。自从20世纪70年代始，我们自主创立了现代电力系统的线性最优控制和非线性最优控制理论，并且成功应用于我国电力系统。这些著作和工程经验均被列入“丛书”系列，影响较大。当时还是青年学者的鞠平就认真阅读研究，可能受此影响的缘故吧，此后，鞠平教授就长期从事电力系统建模与控制研究，取得了丰富的研究成果，在研究生教学方面也积累了丰富的经验。经过归纳梳理形成《现代电力系统控制与辨识》一书。

该书构建了现代电力系统控制与辨识的知识体系，包括现代电力系统控制系统、现代电力系统控制理论、现代电力系统辨识。该著作理论联系实际，论述简明扼要、深入浅出，尤适合研究生阅读，亦可供工程技术人员参考。

该书是“现代电力系统丛书”的重要组成部分。我作为丛书的主编非常愿意为该书作序。希望并相信该书的问世对该领域的人才培养和学术研究水平的提高能起到有力的推动作用。

清华大学电机系



2014年5月



# 前 言

安全经济运行是现代电力系统的基本要求,这是以电力系统控制为基础的。

在过去的几十年间,电力系统控制已经取得相当多的成果,我国电力科技工作者对此作出了重要贡献。卢强教授等所著《输电系统最优控制》是电力系统现代控制理论的开山之作,此后出版的《电力系统非线性控制》是电力系统现代控制理论的重大突破。实际上,这两本专著是我自从1982年就读研究生以来在这个领域进行学习和研究的路标。在卢强老师的鼓励和推荐下,我鼓起勇气将相关教学成果和研究成果写成这本书稿。

本书共9章,分为3篇。第1篇“电力控制系统”由3章组成,分别介绍现代电力系统三大控制系统,即自动安全稳定控制(ASC)、自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC)。第2篇“电力系统的优化控制”由2章组成,分别介绍电力系统的线性最优控制和非线性优化控制理论与方法。第3篇“电力系统的参数辨识”由3章组成,介绍现代电力系统辨识原理与方法,并以励磁系统和风电机组的参数辨识为例加以应用。

本书在现代电力系统控制领域主要做了3方面工作:一是知识梳理。以往有关电力系统控制的知识比较分散,一些专著或偏重工程实际、或偏重理论创新,对于部分知识分散单独介绍,本书梳理出现代电力系统控制的知识体系——控制系统、控制理论、系统辨识。二是知识消化。以往有关电力系统控制的一些知识对于学生比较深奥难懂,本书采用一些形象生动的比喻、由浅入深的讲解,使学生能够比较好地理解和接受有关知识。三是知识创新。书中少量内容是我们团队的研究成果,团队成员吴峰、韩敬东、潘学萍、余一平、陈谦、金宇清、秦川等参与了部分研究工作。总之,虽然本书的大部分内容并非笔者的创新成果,但经过笔者的梳理消化,使之成为现代电力系统控制领域通俗易懂的知识体系。

本书所涉及工作成果离不开韩祯祥院士、马大强教授、朱受天副教授等恩师的培养,离不开许多同行专家的指导和学校的帮助。相关研究工作得到下列基金的资助:国家自然科学基金重点项目(No. 51137002),国家自然科学基金重大项目课题(No. 51190102),国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2013CB228204),国家高技术研究发展计划(863计划)课题(No. 2011AA05A103)等。清华大学出版社张占奎先生等帮助进行编辑工作,朱庭菊女

士帮助绘制不少图表,一些研究生帮助整理了部分书稿。本书的出版得到了清华大学出版社“现代电力系统丛书”出版基金的资助。在此,一并表示衷心的感谢!

限于作者水平和实践经验,书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。联系方式: pju@hhu.edu.cn。

鞠 平

2014年10月于河海大学

# 目 录

<b>第 1 章 导论</b> .....	1
1.1 从停电事故谈起 .....	1
1.1.1 各国停电事故.....	1
1.1.2 我国停电事故.....	2
1.1.3 美加“8·14”大停电案例剖析 .....	3
1.1.4 电力系统扰动 .....	14
1.2 现代控制理论概述.....	16
1.2.1 控制理论的发展 .....	16
1.2.2 现代控制理论的主要内容 .....	19
1.3 现代电力系统控制概述.....	20
1.3.1 现代电力系统控制内容 .....	20
1.3.2 现代电力系统控制体系 .....	21
1.3.3 现代电力系统控制组成 .....	22
1.3.4 现代电力系统控制趋势 .....	24
参考文献 .....	25

## 第 1 篇 电力控制系统

<b>第 2 章 安全稳定控制系统</b> .....	29
2.1 引言.....	29
2.2 安全稳定性的.....	29
2.2.1 可靠性 .....	30
2.2.2 安全性 .....	30
2.2.3 稳定性 .....	31
2.3 安全稳定控制的概念.....	33
2.3.1 控制的概念 .....	34
2.3.2 ASC 的内容 .....	34
2.4 安全稳定控制的构成.....	36
2.4.1 ASC 的技术要求与措施 .....	36

2.4.2	ASC 的控制装置与系统 .....	36
2.4.3	ASC 的三道防线 .....	37
2.4.4	ASC 的构成原理 .....	38
2.5	安全稳定控制的决策 .....	39
2.5.1	控制决策的概念 .....	39
2.5.2	预防控制的决策方案 .....	40
2.5.3	紧急控制的决策方案 .....	40
2.5.4	校正控制的决策方案 .....	44
2.6	安全稳定控制的实例 .....	44
	参考文献 .....	45
<b>第 3 章</b>	<b>自动发电控制系统 .....</b>	<b>47</b>
3.1	引言 .....	47
3.2	AGC 的控制结构 .....	49
3.3	AGC 的功能模块 .....	50
3.4	AGC 的控制模式 .....	52
3.5	AGC 的控制算法 .....	57
3.6	AGC 的控制流程 .....	58
3.7	AGC 系统实例 .....	60
	参考文献 .....	62
<b>第 4 章</b>	<b>自动电压控制系统 .....</b>	<b>63</b>
4.1	引言 .....	63
4.2	AVC 的控制体系 .....	63
4.3	AVC 的一级控制 .....	65
4.3.1	AVC 一级电压控制措施 .....	65
4.3.2	变电站的电压无功控制 .....	68
4.4	AVC 的二级控制 .....	70
4.4.1	地区电网 AVC 的特点 .....	70
4.4.2	地区电网 AVC 的目标与原则 .....	70
4.4.3	地区电网 AVC 的控制模式 .....	73
4.4.4	地区电网 AVC 实例 .....	75
4.5	AVC 的三级控制 .....	76
4.5.1	省级 AVC 控制的区别 .....	77
4.5.2	AVC 三级控制的模式 .....	77
4.5.3	AVC 三级控制的主站系统 .....	78
	参考文献 .....	80

## 第 2 篇 电力系统的优化控制

第 5 章 电力系统的线性最优控制 .....	83
5.1 LOC 基本原理 .....	83
5.2 LOC 的设计步骤 .....	84
5.3 LOC 示例 .....	85
5.4 励磁控制 LOC .....	87
5.4.1 系统状态方程 .....	87
5.4.2 控制器设计 .....	89
5.4.3 控制器效果 .....	89
5.5 快速汽门控制 LOC .....	91
5.5.1 系统状态方程 .....	91
5.5.2 控制器设计 .....	92
5.5.3 控制器效果 .....	92
5.6 综合控制 LOC .....	94
5.6.1 系统状态方程 .....	94
5.6.2 控制器设计 .....	94
5.6.3 控制器效果 .....	95
5.6.4 三种控制的比较 .....	98
参考文献 .....	98
第 6 章 电力系统的非线性优化控制 .....	99
6.1 引言 .....	99
6.2 电力系统 NLOC 的微分几何方法 .....	100
6.2.1 NLOC 微分几何方法原理 .....	100
6.2.2 励磁控制 NLOC .....	104
6.2.3 风电机组 NLOC .....	108
6.3 电力系统 NLOC 的直接优化方法 .....	115
6.3.1 NLOC 直接优化方法原理 .....	115
6.3.2 非线性优化的模拟进化算法 .....	118
6.3.3 SVC 的 NLOC .....	123
参考文献 .....	125

## 第 3 篇 电力系统的参数辨识

第 7 章 电力系统辨识原理与方法 .....	129
7.1 电力系统辨识的概念 .....	129

7.1.1	电力系统建模的意义	129
7.1.2	电力系统建模的途径	130
7.1.3	电力系统建模的内容	132
7.1.4	系统辨识的原理	132
7.1.5	系统辨识的方法	134
7.2	系统辨识的特性分析	135
7.3	线性系统辨识的时域方法	140
7.4	线性系统辨识的频域方法	142
7.5	非线性系统辨识的时域方法	146
	参考文献	147
<b>第 8 章</b>	<b>励磁系统的模型与辨识</b>	<b>149</b>
8.1	引言	149
8.2	励磁系统的模型	151
8.2.1	励磁系统的模型结构	151
8.2.2	励磁机的模型	151
8.2.3	励磁调节器的模型	151
8.2.4	PSS 的模型	152
8.2.5	励磁系统的总体模型	153
8.3	励磁系统的时域辨识方法	155
8.4	励磁系统的频域辨识方法	157
8.5	励磁系统的降阶辨识方法	160
8.5.1	励磁系统的降阶辨识模型	160
8.5.2	励磁系统的降阶辨识步骤	161
8.5.3	励磁系统的降阶辨识算例	161
	参考文献	163
<b>第 9 章</b>	<b>风电机组的模型与辨识</b>	<b>165</b>
9.1	引言	165
9.2	风电机组的模型	167
9.2.1	风力机的模型	167
9.2.2	桨距角控制器的模型	169
9.2.3	传动系统的模型	170
9.2.4	发电机的模型	171
9.2.5	变流器的模型	186
9.2.6	控制器的模型	190
9.3	风电机组的辨识	192

---

9.3.1	风电机组的参数辨识策略·····	192
9.3.2	风力机的参数辨识·····	198
9.3.3	控制器的参数辨识·····	200
9.3.4	传动系统的参数辨识·····	208
9.3.5	发电机的参数辨识·····	212
9.3.6	交叉辨识·····	216
	参考文献·····	219

# 第 1 章 导 论

## 1.1 从停电事故谈起

### 1.1.1 各国停电事故

本书从停电事故谈起,从中可以看出加强现代电力系统控制的必要性和重要性。

最近 10 多年来,世界各地发生了一系列停电事故<sup>[1-5]</sup>,如表 1-1 所示。

表 1-1 各国停电事故

序号	发生时间 (持续时间)	地点 (范围)	影响	原因
1	2002 年 7 月 30 日晚 8 时—31 日上午	印度中西部地区	印度近 1/3 地区停电	超指标用电导致电网电压迅速下降
2	2002 年 9 月 23 日中午停电约 1 小时	智利全国绝大部分地区		电厂技术故障
3	2002 年 12 月 23 日上午停电约 2 小时	印度首都新德里及邻近地区		大雾和污染造成的两条输电线路短路
4	2003 年 5 月 15 日停电约 2 小时	美国得州中部和东北部	约 30 万人生活受影响	雷电袭击
5	2003 年 8 月 14 日 6 时—次日 9 时	美国东北部和加拿大东部地区	美、加两国约 5000 万人受影响	具体原因有待查明
6	2003 年 8 月 28 日晚上停电 34 分钟	伦敦和东南部部分地区	40 多万人受影响	保险丝安装错误
7	2003 年 9 月 1 日 10 时—15 时	马来西亚 5 个州		
8	2003 年 9 月 1 日下午—次日 9 时	包括悉尼中央商务区在内的大多数街区		电缆沟着火导致一个主要变电站故障
9	2003 年 9 月 23 日停电持续 3 小时	丹麦首都哥本哈根及瑞典南部地区	380 万人受到影响	输电线路发生故障,两座大核电站中断供电
10	2003 年 9 月 28 日凌晨 4 点—早晨 8 点	意大利全境		法国向意大利供电的输电线路断裂



续表

序号	发生时间 (持续时间)	地点 (范围)	影响	原因
11	2005 年 5 月 25 日 10 点	莫斯科及周边 4 个地区		变压器因过负荷爆炸
12	2006 年 7 月 1 日晚上	中国河南、华中、华北		一条 500kV 线路跳开, 振荡连锁故障
13	2006 年 11 月 4 日晚上 10 点左右, 38 分钟	德国等		2 条线路故障, 3 个孤岛
14	2009 年 11 月 10 日晚上 10:13 分	巴西、巴拉圭	巴西 18 个州, 巴拉圭全国	线路故障
15	2011 年 2 月 4 日 0:29	巴西东北部	失去 8883MW 负荷	继电保护故障
16	2012 年 4 月 10 日 20:30	深圳电网		开关故障
17	2012 年 7 月 30 日 2:30	印度		电力调度

表 1-1 表明, 从事故发生区域来看, 停电事件不仅在发展中国家会发生, 在发达国家也时有发生。从事故发生时间来看, 夏季发生大停电事件最多, 其原因在于夏季用电负荷大, 而且气象条件引发故障的可能性也大。

### 1.1.2 我国停电事故

我国电力系统也曾多次发生过系统性事故, 比如表 1-1 中列出了我国 2006 年一次停电规模较大的事故, 表 1-2 是我国电网在 20 年间的系统性事故发生原因的统计分析<sup>[6]</sup>。

表 1-2 我国电网系统性事故及原因统计分析

事故扩大原因	次数	所占比例/%
1. 电网结构原因共计	187	68.6
(1) 长距离或联系阻抗大的单回路	95	34.9
(2) 高低压电磁环网	55	20.2
(3) 弱联系特大环网	14	5.1
(4) 受端联系过弱及头重脚轻电网	22	8.1
(5) 分支线	1	0.37
2. 运行管理原因共计	192	70.6
(1) 静态稳定破坏		
① 负荷潮流控制不严	35	12.9
② 无功不足, 电压调节器退出	22	8.1
(2) 暂态稳定破坏		
① 发电机失磁	35	12.9