

EPRI 电力系统工程丛书



Power System
Stability and
Control

电力系统

稳定与控制

[加]PRABHA KUNDUR 著
本书翻译组 译



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

EPRI 电力系统工程丛书

电力科技专著出版资金资助项目



TM312
K-206

电力系统 稳定与控制

[加]PRABHA KUNDUR 著

本书翻译组 译

Power System
Stability and
Control



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

电力系统稳定与控制/ (加) 昆德 (Prabha Kundur) 著; 《电力系统稳定与控制》翻译组译. —北京: 中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0823-9

I. 电… II. ①昆…②电… III. 电力系统稳定 IV. TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 067759 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2001-0309 号

Power System Stability and Control

Prabha Kundur, 1st Edition

ISBN 0-07-035958-X

Copyright©1994 by the McGraw-Hill, Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and China Electric Power Press.

本书中文简体字翻译版由中国电力出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

书 名/ 电力系统稳定与控制

书 号/ ISBN7-5083-0823-9

责任编辑/ 刘宇峰

出版发行/ 中国电力出版社 (<http://www.cepp.com.cn>)

地 址/ 北京三里河路6号(邮政编码100044)

经 销/ 全国新华书店

印 刷/ 汇鑫印务有限公司

开 本/ 787毫米×1092毫米 16开本 50.5印张 1143千字

版 次/ 2002年5月第一版 2002年5月第一次印刷

印 数/ 0001—3000册

定 价/ 98.00元(册)

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

EPRI 电力系统工程丛书

电力系统稳定与控制

[加] PRABHA KUNDUR 著

加拿大不列颠哥伦比亚省电力技术实验室公司 总裁及首席执行官

本书翻译组成员名单

组 长： 周孝信 宋永华
成 员： (按翻译章节顺序列出)
 周孝信 1~2 章
 李兴源 3~9 章
 周 波 10 章
 刘俊勇 11~13 章
 刘肇旭 14 章
 李永庄 15 章
 胡学浩 16~17 章
审 校： 傅书邈

献给我的父母亲

中 文 版 序

非常高兴为《电力系统稳定与控制》中文版作序。这本书的英文版于1994年出版后，受到国际电力系统分析界的欢迎，并被用作学生和实际电气工程师的标准参考书。

由于中国和技术发展上正阔步迈入21世纪，其电力系统正在迅速建设以满足对充裕和可靠电力的需求。有着很高的教育水平并在世界同行中享有声望的中国工程师们正面临挑战，即如何优化新的即将投入在线运行的电力系统设施，解决与现有系统相关的复杂问题。将《电力系统稳定与控制》一书译成中文将有助于我的中国同行增加对此类有关电力系统稳定和控制方面发展和经验的了解。

本书所写的电力系统稳定和控制方面内容的来源包括：我在多伦多大学（the University of Toronto）执教的研究生课程，我在安大略水电局（Ontario Hydro）任电力系统规划设计工程师的经验，几个与我密切相关的美国电力研究院（EPRI, US）的研究项目，以及发表在IEEE、IEE和CIGRE上的大量技术论文。

我写这本书的目的，是在这一领域内提供一个最新的和综合性的论述。本书分为三部分：

第一篇，包括第1章和第2章，提供总的背景信息，叙述现代电力系统的构成，指明控制的不同形式和水平，介绍稳定问题。

第二篇，包括3~11章，专致于设备特性和建模。系统稳定受电力系统中每一主要元件特性的影响。单个元件物理特性及其能力的知识对于了解系统稳定性至关重要。用恰当的数学模型描述这些元件是稳定分析的关键。

第三篇，包括12~17章，研究电力系统稳定的不同类别。重点放在对稳定性现象物理概念的了解。对分析方法连同为缓解稳定问题的控制措施也作了详细叙述。

每一章中的理论都是从简单开始逐渐引向深入，直至该理论可用于复杂的实际情形。为此，每章都辅以大量工作示例，并适时强调历史的展示和过去的经验。

宋永华教授和周孝信教授倡议将本书译成中文。他们在李兴源教授、刘肇旭教授、胡学浩教授、周波教授、李永庄教授、刘俊勇教授的协助下完成翻译工作，傅书昶教授校核全书译文。我对他们9位的出色贡献表示感谢。

最后要指出的是，利用这次译成中文的机会，我将英文版中出现的少量错误作了更正。

普拉布哈·山卡尔·昆德

(Prabha Shankar Kundur)

译者前言

电力系统稳定是电网安全运行的关键，一旦遭到破坏，必将造成巨大的经济损失和灾难性的后果，世界各国不乏惨痛教训之例。近年来世界范围的电力工业改革日益加快，逐步建立了竞争机制下的电力市场。电网的开放和商业化运营使得电力系统运行越来越接近系统极限，经济性和安全稳定性相互制约，使得系统的安全稳定性越来越突出和越来越复杂。这些都对稳定分析与控制提出了新的挑战。更深入地理解稳定机理、建立快速准确的稳定分析方法和提出有效经济的控制措施便成为当务之急。

为此，我们慎重地推荐世界著名电力专家 P. Kundur 博士的论著——《电力系统稳定与控制》一书。该书的最大特点是，基本理论与工业实践有机结合，历史回顾、经验总结与最新发展的技术有机结合，全面而透彻地介绍了电力系统稳定的基本概念、数学模型和不同类型稳定的分析方法及控制手段。该书的英文版已成为国外电力界畅销的经典著作。此书中文版无疑也将成为我国电力系统专业技术人员及在校师生的重要参考资料。

最后，我们感谢 McGraw-Hill 出版公司和 Kundur 博士同意该书在中国出版发行。特别是 Kundur 博士，他曾多次来华讲学，还特地为该书的中文版题写了序言。本书翻译组的全体译者，周孝信、宋永华、李兴源、周波、刘俊勇、刘肇旭、李永庄、胡学浩，历时近两年，为准确翻译此书做了大量的工作；全部译稿由傅书邈审校；国家电力公司和中国电力出版社电力专著出版基金资助了该书的翻译出版。在此一并表示感谢。

周孝信 宋永华

2001.8 于北京

原 版 序

按照著名电力工程师 Charles Steinmetz 的说法，互联的北美电力系统是人类所设计的最大和最复杂的机器。如此庞大的系统竟然以极高的可靠性运行了一个多世纪，不能不说是一个奇迹。

电力系统的鲁棒性体现于系统在正常及受扰条件下运行于平衡点的能力。电力系统的稳定性主要研究电力系统在诸如负荷或发电机突然变化、传输线路发生短路等条件下，电力系统的行为。如果互联的发电机组保持同步，该电力系统被称为稳定的电力系统。

电力系统维持稳定运行的能力很大程度上依赖于系统所具备的阻尼机电振荡的控制手段，因而，研究与设计控制就变得非常重要了。

在所有电力系统的复杂现象中，电力系统稳定性最难以理解而最富有挑战性。由于 21 世纪的电力系统将愈来愈运行在稳定极限附近，这就对电力系统的安全运行提出了更严峻的挑战。

我实在想不出一个比 Prabha Kundur 博士更合适的人选来撰写一本有关电力系统稳定与控制的书籍。Kundur 博士是国际上公认的有关电力系统稳定的专家。他解决电力系统稳定性问题的专家知识与实践经验是无与伦比的。Kundur 博士不但对基本理论有全面而透彻的理解，而且一直致力于解决全世界的电力系统稳定性问题。他教授过许多课程，在专业领域及工业委员会的会议上做过精彩的报告并且在电力系统稳定与控制方面发表了大量的文章。

我非常高兴能够为这本及时的专著作序。我相信这本书将对电力工程领域的学生及工程师产生巨大的价值。

美国电力研究院电力系统分委会
电力系统规划与运行项目经理

Neal J. Balu 博士

原 版 前 言

这是一本有关理解、建模、分析与改善电力系统稳定与控制问题的书。这些问题构成了现代电力系统规划、设计及运行的重要组成部分。由于系统互联和新技术的采用,电力系统的复杂性日趋上升。同时,经济性和电力工业管制所带来的约束条件迫使电力系统运行在稳定极限附近。这两个因素带来了新的电力系统稳定性问题。由此,应用特殊的控制措施来提高系统安全性、辅助经济设计与提供系统运行更大的灵活性被日趋重视。另外,计算机技术、数值分析、控制理论与装置建模领域的新进展为发展更好的分析工具与系统设计过程做出了贡献。本书的主要目的就是介绍这些新的进展并提供该研究领域的一个全面分析与综合。

这本书来源于多方面有关电力系统稳定与控制的材料:它们包括自 1979 年起,我在多伦多大学教授研究生课程资料;与我密切相关的 EPRI 的研究项目(RP1208, RP2447, RP3040, RP3141, RP4000, RP849 与 RP997)和大量的在 IEEE, IEE 与 CIGRE 上发表的论文。

这本书是为与电力系统密切相关的实践工程师以及研究生和电力系统的研究者而写。关于这个主题的专著 15 年前就有;一些非常好的书已有 30~40 年的历史。由于缺乏一本全面的教材,关于电力系统稳定性的课程往往局限于这个主题很窄的方面而强调专门的分析技术。更重要的是,无论是老师还是学生都缺乏直接来自于实践方面的信息。因为这个领域的涉及范围极其广泛,所以刚刚进入该领域的实践工程师往往面临着从广为分散的资料中来获取必要信息的难题。

本书旨在通过提供必要的基本概念,解释实践应用方面,并且对建模技术与分析工具最近进展的全面阐述来弥补这个代沟。全书由三篇组成。第一篇由前两章组成,提供了一般的背景知识。第 1 章描述现代电力系统结构,明确了控制的不同形式和水平。第 2 章介绍了稳定性问题,提供基本的概念、定义与分类。

本书的第二篇由 3~11 章组成,主要讲述装置特性与建模。电力系统的稳定性受到电力系统每一个主要元件特性的影响。欲理解电力系统的稳定性,对每一个元件的物理特性与它们的能力必须有一定的了解。如何用数学工具来描述这些模型对于稳定性分析是至关重要的。第 3~10 章介绍发电机、励磁系统、原动机、交流与直流传输线路与系统负荷的建模。第 11 章介绍了有功控制与无功控制的概念,提出了控制设备的模型。

第三篇由 12~17 章组成，主要研究不同类型的电力系统稳定性。这部分的重点放在对稳定性现象诸多方面的物理概念的理解，详尽阐述了分析的方法与改善稳定性问题的控制措施。

电力系统稳定性的概念是与电力系统控制紧密相联的。电力系统的整体控制是在一个分层结构中高度分散的。这些控制强烈的影响到系统的稳定性。

每一章都按由浅到深的方式展开，直至该理论能够应用于复杂的实际情形。每章都有大量的例子加以说明。在任何可能的地方，历史的回顾与过去的经验都会被加以强调。

由于这是本书的初版，难免有论述不够充分的地方。还可能存在一些印刷或其他方面的错误。我非常欢迎有关这些错误的反馈意见；我也非常欢迎各方面的意见以便再版时加以改进。

我想感谢很多人帮助我准备这本书。Baofu Gao 与 Sainath Moorty 帮助我完成了本书的许多计算与计算机仿真。Kip Morison, Solomon Yirga, Meir Klein, Chi Tang 与 Deepa Kundur 也帮助我提供了一些计算结果。

Atef Morched, Kip Morison, Ernie Neudorf, Graham Rogers, David Wong, Hamid Hamadanizadeh, Behnam Danai, Saeed Arabi 与 Lew Rubino 审阅了本书的多章并提出了可贵的评论。

David Lee 审阅了第 8 章与第 9 章，并且提出了许多宝贵建议。22 年来，我与 Lee 先生在许多与复杂电力系统稳定性相关的问题上紧密合作，本书多处反映了我们共同的研究成果。

Carson Taylor 审阅了书稿并提出了改进本书的许多有益建议。另外，与 Taylor 先生，Charles Concordia 博士，Yakout Mansour 先生的许多富有启发性的讨论帮助我形成了对电力系统稳定性分析当前与未来需求的更好认识。

Patti Scott 与 Christine Hebscher 编辑了手稿的初稿，Janet Kibblewhite 编辑了手稿的终稿并提出了许多改进的建议。

我想深深地感谢 Lei Wang 与他的妻子 Xiaolu Meng，他们为书稿包括插图的准备做出了杰出的工作。

借这个机会，我想感谢 Paul L. Dandeno 先生在我职业生涯的早期在安大略水电局对我的鼓励与信任。正是由于他的引导，我加入了电力行业，后来又从事了本书所涉及的有关电力系统动态特性的许多领域。

我想感谢美国电力研究院 (EPRI) 对本书的赞助。我想特别地感谢 Neal Balu 博士和 Mark Lauby 先生给以我的鼓励与支持。Mark Lauby 先生也审阅了书稿并提出了许多帮助性的建议。

我想感谢 Liz Doherty 和 Patty Jones，他们帮我处理与本书相关的通信及其他商务事件。

最后，我要感谢我的妻子，Geetha Kundur，在我撰写此书的漫长岁月中所给予我的不懈支持与鼓励。

Prabha Shankar Kundur

目 录

中文版序
译者前言
原版序
原版前言

第一篇 概 论

第 1 章 现代电力系统的基本特性	3
1.1 电力系统的发展历史	3
1.2 电力系统的结构	5
1.3 电力系统控制	6
1.4 稳定性的设计和运行准则	9
参考文献	11
第 2 章 电力系统稳定问题导论	13
2.1 基本概念和定义	13
2.1.1 转子角稳定	14
2.1.2 电压稳定和电压崩溃	19
2.1.3 中期和长期稳定	23
2.2 稳定的分类	24
2.3 稳定问题的历史回顾	25
参考文献	27

第二篇 装置特性和建模

第 3 章 同步电机理论和建模	33
3.1 物理描述	33
3.1.1 电枢和磁场结构	33

3.1.2	多极对电机	35
3.1.3	磁通势 (MMF) 波形	35
3.1.4	直轴和交轴	37
3.2	同步电机的数学描述	37
3.2.1	磁路方程回顾	38
3.2.2	同步电机的基本方程	40
3.3	dq0 坐标变换	45
3.4	标么表示	51
3.4.1	定子量的标么系统	51
3.4.2	标么定子电压方程	52
3.4.3	标么转子电压方程	53
3.4.4	定子磁链方程	53
3.4.5	转子磁链方程	54
3.4.6	转子量的标么系统	54
3.4.7	标么功率和转矩	56
3.4.8	不同的标么系统和变换	57
3.4.9	标么方程一览	58
3.5	直轴和交轴的等值电路	60
3.6	稳态分析	63
3.6.1	电压、电流和磁链的关系	64
3.6.2	相量表示	65
3.6.3	转子角	67
3.6.4	稳态等值电路	67
3.6.5	计算稳态值的过程	68
3.7	电暂态性能特性	71
3.7.1	简单 RL 电路中的短路电流	71
3.7.2	同步电机的机端三相短路	72
3.7.3	短路电流中直流偏移的消除	73
3.8	磁路饱和	74
3.8.1	开路和短路特性	74
3.8.2	稳定研究中饱和的表示	75
3.8.3	改进的饱和模型	77
3.9	运动方程	83
3.9.1	运动机械学的回顾	84
3.9.2	摇摆方程	84
3.9.3	机械启动时间	86
3.9.4	惯性常数的计算	87
3.9.5	系统研究中的表示	89
	参考文献	89

第 4 章	同步电机参数	93
4.1	运算参数	93
4.2	标准参数	96
4.3	频率响应特性	106
4.4	同步电机参数的确定	107
	参考文献	110
第 5 章	稳定研究中同步电机的表示	113
5.1	研究大规模系统的必要简化	113
5.1.1	定子 $p\psi$ 项的忽略	113
5.1.2	忽略速度变化对定子电压的影响	115
5.2	忽略阻尼绕组的简化模型	119
5.3	恒磁链模型	122
5.3.1	经典模型	122
5.3.2	包括次暂态电路影响的恒磁链模型	125
5.3.3	不同时段简化模型一览	126
5.4	无功容量极限	127
5.4.1	无功容量曲线	127
5.4.2	V形曲线和合成曲线	129
	参考文献	131
第 6 章	交流输电	133
6.1	输电线	133
6.1.1	电气特征	133
6.1.2	性能方程	134
6.1.3	自然或冲击阻抗负荷	137
6.1.4	输电线的等值电路	138
6.1.5	典型参数	139
6.1.6	电力传输线的性能要求	141
6.1.7	空载时电压和电流的分布	141
6.1.8	电压-功率特性	145
6.1.9	功率传输和稳定性考虑	147
6.1.10	线损对 $V-P$ 和 $Q-P$ 特性的影响	150
6.1.11	热极限	151
6.1.12	带负荷能力特性	151
6.2	变压器	153
6.2.1	双绕组变压器的表示	154
6.2.2	三绕组变压器的表示	160
6.2.3	移相变压器	163
6.3	电源之间的功率传递	166
6.4	潮流分析	169

6.4.1	网络方程	170
6.4.2	高斯-塞德尔法	172
6.4.3	牛顿-拉夫逊 (N-R) 法	173
6.4.4	快速分解潮流 (FDLF) 法	176
6.4.5	各种潮流解法的比较	178
6.4.6	面向稀疏矩阵的三角因子化	178
6.4.7	网络简化	179
	参考文献	179
第 7 章	电力系统负荷	183
7.1	基本的负荷建模概念	183
7.1.1	静态负荷模型	184
7.1.2	动态负荷模型	185
7.2	感应电动机的建模	187
7.2.1	感应电机方程	188
7.2.2	稳态特性	193
7.2.3	不同的转子结构	197
7.2.4	饱和的表示	198
7.2.5	标么表示	199
7.2.6	稳定研究中的表示	201
7.3	同步电动机模型	205
7.4	负荷模型参数的获取	205
7.4.1	基于测量的方法	205
7.4.2	基于元件的方法	207
7.4.3	样本负荷特性	208
	参考文献	209
第 8 章	励磁系统	213
8.1	励磁系统的要求	213
8.2	励磁系统的元件	214
8.3	励磁系统的类型	215
8.3.1	直流励磁系统	215
8.3.2	交流励磁系统	216
8.3.3	静止励磁系统	218
8.3.4	近来的发展和未来的趋势	221
8.4	动态性能测量	221
8.4.1	大信号性能测量	222
8.4.2	小信号性能测量	223
8.5	控制和保护功能	225
8.5.1	交流和直流调节器	225
8.5.2	励磁系统稳定电路	226

8.5.3	电力系统稳定器 (PSS)	227
8.5.4	负荷补偿	227
8.5.5	欠励限制器	228
8.5.6	过励限制器	228
8.5.7	伏特/赫兹 (V/Hz) 限制器和保护	229
8.5.8	磁场短接电路	230
8.6	励磁系统的建模	230
8.6.1	标么系统	231
8.6.2	励磁系统元件的建模	234
8.6.3	完整励磁系统的建模	242
8.6.4	模型建立和检验的现场试验	249
	参考文献	250
第 9 章	原动机和能量供给系统	253
9.1	水轮机及其调速系统	253
9.1.1	水轮机的传递函数	254
9.1.2	假设无弹性水柱下的非线性水轮机模型	259
9.1.3	水轮机的调速器	263
9.1.4	详细的水力系统模型	270
9.1.5	水轮机建模的准则	277
9.2	汽轮机及其调速系统	278
9.2.1	汽轮机的建模	281
9.2.2	汽轮机的控制	288
9.2.3	汽轮机偏离正常频率运行的能力	296
9.3	热能系统	299
9.3.1	矿物燃料能量系统	299
9.3.2	核能系统	303
9.3.3	热能系统的建模	306
	参考文献	306
第 10 章	高压直流输电	309
10.1	HVDC 系统的接线和元件	310
10.1.1	HVDC 输电连接的分类	310
10.1.2	HVDC 输电系统的元件	311
10.2	换流器理论和性能方程式	312
10.2.1	阀的特性	313
10.2.2	换流器电路	313
10.2.3	换流变压器额定值	327
10.2.4	多桥换流器	328
10.3	非正常运行	330
10.3.1	逆弧 (逆火)	330

10.3.2	换向失败	331
10.4	HVDC 系统的控制	332
10.4.1	控制的基本原理	332
10.4.2	控制的实施	341
10.4.3	换流器触发控制系统	342
10.4.4	阀的闭锁和旁路	345
10.4.5	起动、停运和潮流反转	346
10.4.6	提高交流系统性能的控制	347
10.5	谐波及滤波器	348
10.5.1	交流侧谐波	348
10.5.2	直流侧的谐波	350
10.6	交流系统强弱对交流/直流系统相互作用的影响	351
10.6.1	短路比	351
10.6.2	无功功率和交流系统强度	352
10.6.3	低 ESCR 系统存在的问题	352
10.6.4	与弱交流系统相关问题的解决	353
10.6.5	有效惯性常数	354
10.6.6	强制换相	354
10.7	对直流和交流故障的响应	354
10.7.1	直流线路故障	355
10.7.2	换流器故障	356
10.7.3	交流系统故障	356
10.8	多端直流输电系统	358
10.8.1	MTDC 网络结构	359
10.8.2	MTDC 系统的控制	360
10.9	直流输电系统的模型	363
10.9.1	潮流计算中的表达式	363
10.9.2	直流量的标么值系统	376
10.9.3	稳定性研究中的表示	377
	参考文献	385
第 11 章	有功功率和无功功率的控制	389
11.1	有功功率和频率控制	389
11.1.1	调速系统的基本工作原理	390
11.1.2	发电机组功率输出的控制	395
11.1.3	电力系统的复合调节特性	396
11.1.4	汽轮机-调速器系统的响应速度	398
11.1.5	自动发电控制的基本原理	400
11.1.6	AGC 的实施	411
11.1.7	低频减负荷	415