

清华大学电气工程系列教材

电力系统稳定分析

Power System Stability

闵勇 陈磊 姜齐荣 编著

Min Yong Chen Lei Jiang Qirong

清华大学出版社

清华大学电气工程系列教材

电力系统稳定分析

Power System Stability

闵勇 陈磊 姜齐荣 编著

Min Yong Chen Lei Jiang Qirong

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书共分七章,分别为概述、电力系统的主要元件特性、电力系统静态稳定、电力系统暂态稳定、电力系统暂态稳定分析的直接法、电力系统电压稳定、电力系统频率稳定,并包含一个附录:稳定性分析的数学基础。

本书的目的是帮助读者掌握电力系统稳定的基本概念和基本分析方法,讲解中既注重数学推导,也注重分析概念和公式的物理意义,并配有适当数目的例题和习题。可作为高等院校相关专业本科生教材和研究生参考书。

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

电力系统稳定分析/闵勇,陈磊,姜齐荣编著. —北京:清华大学出版社,2016

清华大学电气工程系列教材

ISBN 978-7-302-43432-0

I. ①电… II. ①闵… ②陈… ③姜… III. ①电力系统稳定—稳定分析—高等学校—教材 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 072669 号

责任编辑:冯 昕 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

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:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15 字 数:365 千字

版 次:2016 年 10 月第 1 版 印 次:2016 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:068291-01

清华大学电气工程系列教材编委会

主 任 曾 嵘

编 委 梁曦东 孙宏斌 夏 清

肖 曦 于歆杰 袁建生

赵 伟 朱桂萍

序



“电气工程”一词源自英文的“Electrical Engineering”。在汉语中，“电工程”念起来不顺口，因而便有“电机工程”、“电气工程”、“电力工程”或“电工”这样的名称。20 世纪 60 年代以前多用“电机工程”这个词。现在国家学科目录上已经先后使用“电工”和“电气工程”作为一级学科名称。

大约在第二次世界大战之后出现了“电子工程”(Electronic Engineering)这个词。之后，随着科学技术的迅速发展，从原来的“电(机)工程”范畴里先后分划出“无线电电子学(电子工程)”“自动控制(自动化)”等专业，“电(机)工程”的含义变窄了。虽然“电(机、气)工程”的专业含义缩小到“电力工程”和“电工制造”的范围，但是科学技术的发展使得学科之间的交叉、融合更加密切，学科之间的界限更加模糊。“你中有我，我中有你”是当今学科或专业的重要特点。因此，虽然高等院校“电气工程”专业的教学主要定位于培养与电能的生产、输送、应用、测量、控制等相关科学和工程技术的专业人才，但是教学内容却应该有更宽广的范围。

清华大学电机系在 1932 年建系时，课程设置基本上仿效美国麻省理工学院电机工程学的模式。一年级学习工学院的共同必修课，如普通物理、微积分、英文、国文、画法几何、工程画、经济学概论等课程；二年级学习电工原理、电磁测量、静动力学、机件学、热机学、金工实习、微分方程及化学等课程；从三年级开始专业分组，电力组除继续学习电工原理、电工实验、测量外，还学习交流电路、交流电机、电照学、工程材料、热力工程、电力传输、配电工程、发电所、电机设计与制造以及动力厂设计等选修课程。西南联大时期加强了数学课程，更新了电工原理教材，增加了电磁学、应用电子学等主干课程和电声学、运算微积分等选修课程。抗战胜利之后又增设了一批如电子学及其实验，开关设备、电工材料、高压工程、电工数学、对称分量、汞弧整流器等选修课程。

1952 年院系调整之后，开始了学习苏联教育模式的教学改革。电机系以莫斯科动力学院和列宁格勒工业大学为模式，按专业制定和修改教学计划及教学大纲。这段时期教学计划比较注重数学、物理、化学等基础课，注重电工基础、电机学、工业电子学、调节原理等技术基础课，同时还加强了实践环节，包括实验、实习和“真刀真枪”的毕业设计等。但是这个时期存在专业划分过细，工科内容过重等问题。

改革开放之后，教学改革进入一个新的时期。为了适应科学技术的发展和人才市场从

计划分配到自主择业转变的需要,清华大学电机系在 20 世纪 80 年代末把原来的电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电机及其控制等专业合并成“宽口径”的“电气工程及其自动化”专业,并且开始了更深刻的课程体系的改革。首先,技术基础课的课程设置和内容得到大大的拓展。不但像电工基础、电子学、电机学这些传统的技术基础课的教学内容得到更新,课时有所压缩,而且像计算机系列课、控制理论、信号与系统等信息科学的基础课程以及电力电子技术系列课已经规定为本专业必修课程。此外,网络和通信基础、数字信号处理、现代电磁测量等也列入了选修课程。其次,专业课程设置分为专业基础课和专业课两类,初步完成了从“拼盘”到“重组”的改革,覆盖了比原先 3 个专业更宽广的领域。电力系统分析、高电压工程和电力传动与控制等成为专业基础课,另外,在专业课之外还有一组以扩大专业知识和介绍新技术、新进展为主的任选课程。

虽然在电气工程学科基础上新产生的一些研究方向先后形成独立的学科或专业,但是曾经作为第三次工业革命三大动力之一的电气工程,其内涵和外延都会随着科学技术和社会经济的发展而发展。大功率电力电子器件、高温超导线材、大规模互联电网、混沌动力学、生物电磁学等新事物的出现和发展等,正在为电气工程学科的发展开辟新的空间。教学计划既要有相对的稳定,又要与时俱进、不断有所改革。相比之下,教材的建设往往相对滞后。因此,清华大学电机系决定分批出版电气工程系列教材,这些教材既反映近 10 多年来广大教师积极进行教学改革已经取得的丰硕成果,也表明我们在教材建设上还要不断努力,为本专业和相关专业的教学提供优秀教材和教学参考书的决心。

这是一套关于电气工程学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。主要读者对象为电气工程专业本科生、研究生以及在本专业领域工作的科学工作者和工程技术人员。欢迎广大读者提出宝贵意见。

清华大学电气工程系列教材编委会

2003 年 8 月于清华园

前言

电力系统稳定分析的基本目的是判断在一种给定的运行方式下电力系统承受扰动的能力。为保证电力系统的正常运行,在电力系统的规划设计、生产计划安排、运行方式校核、控制装置设计和保护措施整定等各个环节都必须对系统的稳定性进行详细的分析、计算和评估。因此,电力系统稳定的基本概念和基本分析方法是电力系统相关知识体系中十分重要的基础组成部分。

电力系统稳定分析与潮流分析、故障分析并列为电力系统的三大计算,但是由于稳定分析和计算的对象通常是描述系统动态行为的高阶非线性微分方程组,其基本分析方法与潮流分析和故障分析有很大的不同,容易给初学者带来困扰。同时稳定分析的复杂度和难度也远高于另外两者,部分稳定现象至今仍没有成熟的分析方法,在机理、模型和算法等方面都还需要持续深入的研究工作。

本书以高等院校电力系统稳定分析课程的本科生教材为基本定位,以帮助读者确切理解电力系统稳定的基本概念并掌握基本分析方法为主要目的,采用由浅入深的讲授方法,即从简单系统入手,基于理想化的假设建立系统的基本模型,然后从数学推导和物理概念两方面综合论述,逐渐引出相关概念和基本分析方法,同时帮助读者逐渐熟悉稳定分析的基本思想,对于容易混淆的概念或者需要加深理解的知识点则采用讨论或页注的形式加以说明。对于稳定分析方法在实际工程问题中的应用则只进行了简单介绍。

全书共分七章。第1章概述部分主要介绍稳定问题的意义、概念和分类,第2章介绍了稳定分析中常用的发电机、励磁系统、调速系统和负荷的基本模型,第3章和第4章分别介绍了电力系统静态稳定和暂态稳定的基本概念和分析方法,第5章电力系统暂态稳定的直接法主要侧重于对能量函数方法的介绍,第6章和第7章分别介绍了电力系统电压稳定、电力系统频率稳定方面的基本内容,附录部分列出了电力系统稳定分析中经常用到的一些数学知识。

本书的初稿是为清华大学电机系电力系统方向本科生的电力系统稳定分析与控制课程所编写的讲义,经过十多届本科生教学中的试用、修改而成书。由于电力系统稳定问题内涵和外延十分丰富,并且还在随着电力系统技术的发展而不断扩充,同时受作者的学识和能力所限,书中错误和不足之处在所难免,热忱欢迎读者批评指正。

编者

2016年1月1日于清华园

目录

第 1 章	概述	1
1.1	稳定问题的提出和研究内容	1
1.1.1	电力系统联网的效益	1
1.1.2	电力系统稳定问题的提出	2
1.1.3	稳定研究的内容	3
1.2	电力系统稳定的基本概念	4
1.2.1	电力系统运行的稳定性	4
1.2.2	电力系统稳定问题的概念和分类	5
1.3	电力系统稳定研究的对象和方法	9
第 2 章	电力系统的主要元件特性	11
2.1	同步发电机的机电特性	11
2.1.1	同步发电机转子运动方程	11
2.1.2	发电机惯性时间常数	14
2.1.3	发电机的电磁转矩和功角方程	16
2.1.4	转子绕组的电磁暂态过程及方程	32
2.2	同步发电机的阻尼特性	33
2.3	发电机自动励磁调节系统	35
2.3.1	励磁系统的作用	35
2.3.2	主励磁系统	36
2.3.3	自动励磁调节系统	40
2.4	发电机自动调速系统	42
2.4.1	原动机特性	42
2.4.2	自动调速装置	44
2.5	负荷特性	48
2.5.1	考虑机械暂态过程时异步电动机的动态特性	49
2.5.2	考虑机电暂态过程时异步电动机的动态特性	51

2.5.3	典型综合负荷的描述形式	52
2.5.4	负荷的静态特性	53
	练习题	55
第 3 章	电力系统静态稳定	57
3.1	静态稳定的基本概念	57
3.2	单机无穷大系统静态稳定	57
3.2.1	理想情况分析	57
3.2.2	单机无穷大系统的特征根分析法	64
3.3	调节装置对静态稳定的影响	70
3.3.1	不连续调节励磁对静态稳定的影响	71
3.3.2	自动连续励磁调节对静态稳定的影响	73
3.3.3	自动调速系统对静态稳定的影响	93
3.4	复杂系统的静态稳定性	95
3.4.1	两机系统的静态稳定性分析	95
3.4.2	多机系统的静态稳定性分析	99
3.5	负荷的静态稳定性	103
3.5.1	异步电动机的转矩-滑差特性分析	103
3.5.2	异步电动机的无功-电压特性分析	104
3.6	提高静态稳定的措施	106
3.6.1	采用先进的自动励磁调节系统	106
3.6.2	减少系统元件的电抗	106
3.6.3	改善系统网络结构和维持电压的能力	107
	练习题	108
第 4 章	电力系统暂态稳定	109
4.1	暂态稳定的基本概念	109
4.2	单机无穷大系统的暂态稳定性	111
4.2.1	单机无穷大系统扰动前后的功率特性	111
4.2.2	暂态稳定过程的物理过程分析	113
4.2.3	等面积定则	116
4.2.4	转子运动方程的求解	121
4.3	自动调节系统对暂态稳定性的影响	125
4.3.1	自动励磁调节系统的影响	125
4.3.2	考虑励磁调节装置作用时的暂态稳定分析	126
4.3.3	自动调速装置的作用	127
4.4	复杂系统暂态稳定计算	128
4.4.1	求解方法	129
4.4.2	系统模型	130

4.4.3 算法实现	134
4.5 提高暂态稳定性的措施	135
练习题	137
第 5 章 电力系统暂态稳定分析的直接法	138
5.1 引言	138
5.2 单机无穷大系统的直接法分析	141
5.2.1 问题描述	141
5.2.2 单机无穷大系统的稳定域	142
5.2.3 能量函数方法	145
5.2.4 能量函数法的保守性	148
5.3 直接法在多机电力系统中的应用	152
5.3.1 多机电力系统中的能量函数	152
5.3.2 PEBS 方法	155
5.3.3 BCU 方法	157
5.3.4 稳定边界的二次曲面近似方法	158
5.3.5 其他方法	160
第 6 章 电力系统电压稳定	161
6.1 电力系统电压稳定性的基本概念	161
6.2 电力系统电压稳定性的分析方法	162
6.2.1 静态电压稳定分析的基本方法	162
6.2.2 临界功率与电压崩溃	168
6.3 电力系统电压稳定性防治措施	177
第 7 章 电力系统频率稳定	180
7.1 引言	180
7.2 电力系统频率的基本概念	181
7.2.1 传统的信号频率定义	181
7.2.2 电力系统中的频率概念	182
7.3 电力系统频率调整	184
7.3.1 发电机功率频率静态特性	184
7.3.2 负荷频率静态特性	185
7.3.3 电力系统的频率调整	186
7.4 电力系统频率动态过程分析	188
7.4.1 单机模型下的频率动态过程分析	188
7.4.2 两机系统频率动态过程的分析	191
7.4.3 多机系统频率动态过程的分析	194

7.5	频率紧急控制	199
7.5.1	电力系统紧急控制的概念	199
7.5.2	低频减载方案及其动作效果	200
附录 A	稳定性分析的数学基础	205
A.1	常微分方程组	205
A.1.1	常微分方程组解的性质	205
A.1.2	常微分方程组的数值解法	206
A.2	动力系统的基本知识	208
A.2.1	自治系统与非自治系统	208
A.2.2	平衡点、不变集、极限集	209
A.2.3	非线性自治系统在平衡点处的线性化处理	210
A.3	稳定性的基本概念	212
A.3.1	自治系统零解的稳定性	213
A.3.2	线性系统的稳定性	214
A.4	非线性动力系统的稳定域理论	216
A.4.1	自治系统平衡点的分类	216
A.4.2	稳定流形、不稳定流形和稳定域	217
A.4.3	李雅普诺夫函数和能量函数	218
A.4.4	稳定域的拓扑结构	219
参考文献		221

插图目录

图 1.1	单电源系统	1
图 1.2	简单互联系统	1
图 1.3	IEEE/CIGRE 电力系统稳定问题分类	6
图 1.4	我国电力系统中目前使用的稳定问题分类	8
图 2.1	发电机 δ 和 ω 、 ω_N 的关系	12
图 2.2	abc 坐标到 $dq0$ 坐标	16
图 2.3	单机无穷大系统接线图	18
图 2.4	隐极机相量图	19
图 2.5	E_q 恒定时隐极机的功角特性曲线	20
图 2.6	E'_q 恒定时隐极机功角特性曲线	22
图 2.7	例 2.1 的系统图	22
图 2.8	例 2.1 的功角特性曲线图	24
图 2.9	凸极机相量图	24
图 2.10	E_q 恒定时凸极发电机功角特性曲线	25
图 2.11	E'_q 恒定时凸极发电机功角特性曲线	25
图 2.12	例 2.2 的功角特性曲线图	26
图 2.13	两机系统示意图	27
图 2.14	两机系统功角特性	27
图 2.15	例 2.3 的两机系统接线图	28
图 2.16	例 2.3 的两机系统的星形等值网络	29
图 2.17	例 2.3 的两机系统的三角形等值网络	29
图 2.18	例 2.3 的两机系统的功角特性曲线	30
图 2.19	带电阻的单机无穷大系统	30
图 2.20	单机无穷大系统计及电阻时的功角特性	31
图 2.21	转子回路磁链分布示意图	32
图 2.22	考虑不同绕组时发电机的阻尼特性	34

图 2.23	汽轮发电机电磁阻尼转矩的各分量	34
图 2.24	增加励磁电流对发电机运行的影响	35
图 2.25	最简单的直流励磁机励磁系统	36
图 2.26	具有副励磁机的直流励磁机励磁系统	37
图 2.27	他励式静止半导体励磁系统	37
图 2.28	他励直流发电机励磁系统	38
图 2.29	励磁机的负载特性曲线	38
图 2.30	他励直流励磁机传递函数框图	40
图 2.31	饱和特性示意图	40
图 2.32	可控硅励磁调节器原理框图	40
图 2.33	可控硅励磁调节器传递函数框图	41
图 2.34	汽轮机结构示意图	42
图 2.35	汽轮机传递函数框图	43
图 2.36	水轮发电机示意图	43
图 2.37	水锤效应示意图	43
图 2.38	离心飞摆式调速器工作原理图	44
图 2.39	机械液压式调速器框图	46
图 2.40	功频电液式调速器原理图	47
图 2.41	功频电液式调速器框图	47
图 2.42	异步电动机等值电路	50
图 2.43	异步电动机的转矩-滑差特性	51
图 2.44	暂态电势表示的异步机等值电路	51
图 2.45	典型综合负荷示意图	52
图 2.46	题 2.2 的系统图	55
图 2.47	题 2.4 的系统图	56
图 2.48	题 2.5 的系统图	56
图 3.1	单机无穷大系统接线图	58
图 3.2	单机无穷大系统相量图	58
图 3.3	单机无穷大系统功角特性曲线	58
图 3.4	无阻尼时的转子角和转速动态过程	59
图 3.5	有阻尼时的转子角动态过程	59
图 3.6	失稳情况下的转子角动态过程	60
图 3.7	同步功率系数的变化特性	61
图 3.8	E_q 恒定时凸极机的功角特性曲线	61
图 3.9	E'_q 恒定时发电机的功角特性曲线	61
图 3.10	例 3.1 的系统图	62
图 3.11	单机无穷大系统中的发电机框图	65

图 3.12	考虑阻尼作用时的发电机框图	68
图 3.13	不连续调节励磁的动作情况示意图	71
图 3.14	发电机相量图	72
图 3.15	简化的励磁调节系统	74
图 3.16	带励磁调节器的发电机框图	77
图 3.17	K_1 、 K_2 及 $K_4 \sim K_6$ 随运行工况的变化趋势	78
图 3.18	例 3.6 的相量图	79
图 3.19	$K_A = K_{A\min}$ 时系统失稳的示意图	86
图 3.20	电磁转矩 ΔT_E 与转子角 $\Delta\delta$ 的关系	86
图 3.21	常规励磁系统中参数对阻尼转矩系数 K_{ED} 的影响	89
图 3.22	PSS 原理示意图	91
图 3.23	比例式励磁调节过程示意图	92
图 3.24	不同励磁调节方式的比较	93
图 3.25	带调速器的单机无穷大系统框图	94
图 3.26	两机系统示意图	95
图 3.27	两机系统的功角特性	96
图 3.28	多机电力系统示意图	99
图 3.29	电力系统元件接口及描述方式	103
图 3.30	异步电动机的转矩-滑差特性	104
图 3.31	单机带异步电动机系统接线图	104
图 3.32	单机带异步电动机系统等值电路	104
图 3.33	异步电动机的无功-电压特性	105
图 3.34	串联电容补偿	107
图 3.35	调相机对静态稳定性的影响	108
图 3.36	题 3.1 的系统图	108
图 3.37	题 3.2 的系统图	108
图 3.38	题 3.3 的系统图	108
图 4.1	单机无穷大系统及其等值电路	112
图 4.2	功率特性曲线和运行点的变化	114
图 4.3	稳定情况下的振荡过程	115
图 4.4	发电机运行点的转移过程	115
图 4.5	故障切除时间太长的情形	115
图 4.6	失稳情况下的振荡过程	116
图 4.7	单机无穷大系统考虑重合闸时的面积图形	118
图 4.8	例 4.1 的系统图	119
图 4.9	例 4.1 的等值电路	120
图 4.10	分段计算法示意图	122

图 4.11	分段算法中操作的处理	124
图 4.12	扰动发生后发电机运行点的转移	125
图 4.13	扰动发生后发电机运行点的转移 (多次振荡)	126
图 4.14	励磁调节器简化框图	127
图 4.15	快关汽门提高系统暂态稳定性的作用	128
图 4.16	暂态稳定计算中的系统模型示意图	130
图 4.17	暂态稳定计算的简化程序框图	135
图 4.18	题 4.1 的系统图	137
图 4.19	题 4.2 的系统图	137
图 4.20	题 4.3 的系统图	137
图 5.1	稳定边界组成示意图	143
图 5.2	单机无穷大系统的实际稳定域 (小阻尼系数时)	144
图 5.3	单机无穷大系统的实际稳定域 (大阻尼系数时)	144
图 5.4	稳定域、稳定轨线和不稳定轨线	144
图 5.5	单机无穷大系统中的势能函数 $U(\delta)$	147
图 5.6	单机无穷大系统能量函数的三维图	147
图 5.7	沿故障中和故障后轨线计算的能量函数	148
图 5.8	真实稳定域和估计稳定域	148
图 5.9	$\dot{V}_L(\mathbf{x}) \leq 0$ 的说明图	149
图 5.10	基于 LaSalle 不变集原理得到的稳定域估计	149
图 5.11	轨线的出点和决定临界能量的 UEP 不在同一个方向的情况	150
图 5.12	采用主导 UEP 决定临界能量	151
图 5.13	二阶梯度系统中的 $U(\delta)$ 函数的等势面	156
图 6.1	单电源带负荷系统模型	163
图 6.2	刚性负荷的 (P_n, Q_n) 图	164
图 6.3	刚性负荷时系统平衡点的分布区域	164
图 6.4	各种负荷特性对应的系统平衡点区域分布情况	165
图 6.5	等效可变导纳负荷的系统模型	166
图 6.6	单机经线路带负荷系统	166
图 6.7	系统的无功电压特性曲线	166
图 6.8	系统无功电压特性曲线与负荷无功电压特性曲线	167
图 6.9	系统无功电压特性与负荷无功电压特性的相对位置	169
图 6.10	电压崩溃案例 (Nago, 1975)	170
图 6.11	例 6.1 的系统接线及其等值电路	171
图 6.12	例 6.1 的负荷无功电压特性与系统无功电压特性	173
图 6.13	例 6.2 的系统接线及其等值电路图	173

图 6.14	例 6.2 的电压特性曲线	174
图 6.15	负荷的有功电压特性曲线与系统无功电压特性曲线	175
图 6.16	负荷电导不变, 电纳增加时负荷无功电压特性曲线与系统无功电压特性曲线....	176
图 6.17	系统及负荷的无功电压特性曲线	177
图 6.18	串联电容补偿装置简图	178
图 6.19	投切电容器组电路图	178
图 6.20	STATCOM 装置简图	178
图 7.1	复平面中的正弦信号相量	182
图 7.2	发电机组功率频率静态特性	184
图 7.3	负荷有功功率频率静态特性	185
图 7.4	一次调频示意图	187
图 7.5	二次调频示意图	187
图 7.6	单机系统模型框图	189
图 7.7	频率下降过程中的特征量	190
图 7.8	系统备用对频率动态过程的影响	190
图 7.9	两机系统示意图	191
图 7.10	电力系统运行状态及转换关系	199
图 7.11	考虑低频减载措施时的单机系统模型框图	201
图 7.12	低频减载动作效果 (无恢复级).....	202
图 7.13	低频减载动作效果 (有恢复级).....	202

表格目录



表 2.1	可控硅励磁调节器传递函数框图中参数的说明	41
表 2.2	机械液压式调速器框图中各项参数的说明	46
表 2.3	功频电液式调速系统框图中各项参数的说明	48
表 3.1	例 3.7 的计算结果	91
表 4.1	各种简单故障下的附加电抗	113
表 5.1	直接法和时域仿真法的优缺点对比	139
表 5.2	采用直接法分析电力系统暂态稳定的三个阶段	139
表 5.3	时域仿真方法与直接法的原理对比	141
表 7.1	低频减载方案	202