

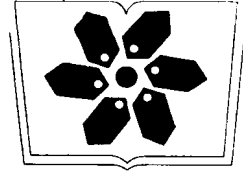


现代电力系统丛书

电力系统稳定性 理论与方法

余贻鑫 王成山 编著

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

现代电力系统丛书

电力系统稳定性理论与方法

余贻鑫 王成山 编著

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书是《现代电力系统丛书》之一,是作者在研究电力系统安全性与稳定性方面所取得最新成果的基础上编写的一部专著,由中国科学院科学出版社基金资助出版。书中系统地介绍了电力系统稳定性方面的一些基本理论与方法,可作为《电力系统的安全性和稳定性》(科学出版社,1988)一书的续篇。全书分为三篇,第一篇主要介绍暂态稳定分析中域的方法,包括电力系统稳定分析的数学基础、暂态稳定分析的数学模型及其拓扑性质、PEBS法的理论基础及BCU法、割集稳定准则和电力系统动态安全域等。第二篇介绍小扰动稳定性分析的有关新知识,包括多变量系统稳定性分析的现代频域法、电力系统的结构保留多变量频域反馈模型、电力系统鲁棒稳定性分析和小扰动稳定域等。第三篇介绍电压稳定性的基本理论和方法,包括电压稳定性的基本概念、动态电压崩溃、电压稳定域和电压安全性测度等。

本书可供电力系统专业的大学生、研究生及教师阅读,同时对从事电力系统有关领域工作的研究人员和工程技术人员亦有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统稳定性理论与方法/余贻鑫王成山编著.-北京:科学出版社,1999. 1

(现代电力系统丛书)

ISBN 7-03-005439-3

I. 电… I. 余… III. 电力系统稳定 IV. TM712

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第25663号

DW 05/10

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

科地王印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1999年1月第一版 开本:787×1092 1/16
1999年1月第一次印刷 印张:24
印数:1—2500 字数:538000

定 价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

现代电力系统丛书编委会

主 编 高景德

副 主 编 张凤祥 卢 强 陈寿孙

编 委 (按姓氏笔划)

卢 强	陈寿孙	张凤祥	张宝霖
庞家驹	周孝信	相年德	高景德
倪以信	韩祯祥	韩英铎	

责任编辑 范铁夫 刘元元

致 读 者

我国社会主义现代化建设的蓬勃发展,正在促进电力系统以空前的规模和速度扩大.到本世纪末,我国各大区将建成以500kV超高压电网为主网,单机300—600MW为主力机组,装机容量达4万—5万MW的大型电力系统.超高压直流输电技术将进一步得到应用,大型电力系统间的互联将得到发展,随着三峡水电工程的兴建,西部地区电源的进一步开发,更高电压的输电系统和全国性的联网也将提上日程,对电力系统安全性、经济性和电能质量提出了更高的要求.实践证明,电力系统的规划设计、运行管理、分析和控制手段的现代化是满足这一要求的最佳途径,许多现代科学技术成果迅速在电力系统中得到推广应用,计算机技术、现代应用数学、现代控制理论、电力电子技术、人工智能等日益广泛深入地应用于电力系统,正在促使这一传统产业迅速走向高科技化.在电力系统安全经济水平和现代化水平提高的同时,电力系统学科也得到更新、丰富与发展.当前,亟需一批反映电力系统学科新进展、新成果的系列专著,为此我们组织编写了这套《现代电力系统丛书》.

丛书旨在反映当代国内外电力系统学科的最新发展和科学技术的水平.丛书将以现代科学的新理论、新方法在电力系统中的应用为主要内容,特别对在我国电力系统中已获得应用或将获得应用的最新成果进行重点介绍.

本丛书由科学出版社和清华大学出版社出版.希望本丛书对我国电力系统的发展、电力系统学科水平的提高、科技人员知识结构的改善将有所贡献.

编委会

前 言

众所周知,电力系统稳定性一旦遭到破坏,必将造成巨大的经济损失和灾难性后果,这一问题多年来一直为人们所关注.近年来,电力系统方面的科技工作者虽已取得了诸多的研究成果,但是寻求更有效地分析电力系统稳定性的方法和更深入地认识电力系统稳定本质的任务从来没有减轻过.这一方面是由于电力系统的单机容量和系统总容量日益增大,区域间互联逐渐增加,电源点越发远离负荷中心,输电系统时常运行于很重的载荷之下,以及机组与系统的控制装置日趋复杂之故.这样的系统在技术、经济和社会效益上是显著的,但许多新的稳定性问题也就随之而来.近年来世界上的大停电事故,特别是电压稳定和电压崩溃事故的频频发生即是例证.另一方面则是由于在线动态安全性评估任务的提出给稳定性的研究提出了更高的要求.

在《电力系统的安全性及稳定性》^[2]一书中,已经介绍了电力系统稳定分析的数学模型、数值仿真方法、动态等值以及基于经典电力系统模型的暂态稳定分析的直接法,并且已经从安全性评估的角度提出了电力系统稳定性的研究任务.本书无意重述那些内容.然而从该书出版至今已经十年,在这期间,电力系统稳定性的理论与方法的研究又有了许多重大的发展,确有再写一本内容全新的关于电力系统稳定性的书的必要.本书列为《现代电力系统丛书》之一,并由中国科学院科学出版基金资助出版,现在奉献给读者.

本书由三篇组成,它们分别是:暂态稳定分析中域的方法,小扰动稳定性分析和电力系统的电压稳定性.

第一篇主要介绍与暂态稳定性分析有关的域的方法.在各种类型的电力系统安全性评估中,基于暂态稳定性要求的电力系统动态安全性评估是最严厉、最苛刻的,也是必须保证的.目前电力调度部门在做运行规划时是采用数值仿真的方法进行暂态稳定分析的.由于该方法所需CPU时间太长,无法直接用于在线动态安全性评估,因此人们对基于暂态能量函数的直接法产生了很大兴趣.近十几年来,关于直接法的研究出现了三大突破,它们是:(1)电力系统的结构保留模型和理论严格的暂态能量函数的建立,在该模型和相应的能量函数中至今已计及了负荷的无功-电压特性、转移电导,包括横轴阻尼绕组动态的详细发电机模型以及横轴电压变化与励磁器的交互作用;(2)对暂态稳定域边界的微分拓扑性质的认识以及由此而完善了的直接法的理论基础;(3)基于原电力系统模型的暂态稳定边界性质和相应的梯度系统稳定边界(即PEBS)性质之间的比较而建立起来的BCU法的理论基础,这些理论已为相关不稳定平衡点(Controlling UEP)方法的改进做出了贡献.本篇开头几章就是围绕这些新的进展展开的.现阶段,暂态能量函数法已用于实际电力系统在线动态安全分析的预想事故选择中,并与数值仿真方法配合使用,从而可以加快整个动态安全分析的速度.

所谓的“暂态稳定域”乃是事故后电力系统状态空间上的域,如果事故后的稳定平衡点和事故清除瞬间系统的状态处于该域之中,则此后系统的轨迹将是稳定的.对于给

定的事故前系统的运行方式(如一个给定的注入向量)和给定的事故,有一个唯一确定的暂态稳定域。从动态安全分析的角度看,使用暂态稳定域的直接法实质上仍然属于逐点(每一个点相应于一个注入向量)地进行安全分析的方法。新近在电力系统动态安全分析中已经提出了一种与逐点法截然不同的全新的方法,即电力系统动态安全域的方法。该域是在事故前电力系统的注入空间或割集功率空间上的域,对于域中的任何一个点,在发生给定事故之后均可确保系统的暂态稳定性得以维持。有了这样的域我们就可以导出系统的安全转移概率和“到不安全的距离”,也易于做出校正性控制的决策。由于动态安全域的微分拓扑性质与暂态稳定域的性质密切相关,故关于这一方法的介绍在第一篇第五章中给出。

对于0.2—3Hz范围内自发增长的机电振荡以及其他诸如次同步谐振等属于小扰动稳定性范畴的失稳现象,正随着现代电力系统的发展而日益引起人们的重视。有关这些现象的研究尽管引起人们的重视,也已取得了大量成果,但对其认识却还没有达到完美的程度,本书第二篇将向读者介绍这方面的一些新成果。这些成果包括:(1)结构保留的电力系统多变量频域反馈模型,它可以计及电力系统的结构性质和负荷的详细特性,在使用的灵活性、小扰动稳定分析时间的节省以及传递函数矩阵的互质性等方面均已显示出独具的优越性;(2)为提高大电力系统小扰动稳定性分析速度而建立的电力系统小扰动稳定分析的分散型频域准则,以及为频域法提供更多信息量而提出的结构保留模型极点分析法;(3)电力系统鲁棒稳定性分析;(4)电力系统小扰动稳定域。

所谓“电力系统的鲁棒稳定性”是指其抗各种参数小扰动的能力。在实际电力系统中,有许多参数(如负荷模型参数、发电机及其控制装置中的某些参数等)是很难准确地确定的。这可能是由于模型简化和提供相应参数的方法所引起的,也可能是由于工作环境和运行状态的变化造成的。传统的小扰动稳定性分析方法常常忽略这种不确定性因素的影响,或在参数不确定集中选择几个确定的点进行稳定性的检验。而对各种复杂的电力系统小扰动稳定性问题,这样做显然具有一定风险。同时,在系统规模较大的情况下,按照常规(逐点检验)的方法进行这种参数扰动的稳定性检验,其计算量也是十分可观的。电力系统鲁棒稳定分析的方法使人们在做个别点的小扰动稳定性分析时,只需附加极少的计算量就可以全面地分析各种不确定因素对电力系统小扰动稳定性的影响。本书中给出了两种新的电力系统鲁棒稳定性检验准则,它们是代数鲁棒稳定性检验准则和范数鲁棒稳定性分析准则。前者是必要且充分条件,后者则是充分条件。这是一个全新的研究领域。

本书第三篇介绍了关于电力系统电压稳定性的有关知识和最新研究成果。近十多年来,在欧美及日本,电压失去稳定乃至系统电压崩溃的事故不断发生。北美许多电力公司确认自己的电力系统内潜存着电压失稳的可能性。因此,关于电压稳定的研究吸引着大批学者,在我国也有不少学者开展和正在开展这方面的研究工作。但是对电力系统电压失稳机理的认识和电压稳定解析工具开发的研究还很不足,而且目前国内尚缺少系统地讲述关于电压稳定问题的著作。因此,本篇用较大篇幅介绍了近年来散见于文献上的国内外研究成果和作者的阶段工作成果,虽然这些成果还远非完善,但希望能启发读者的思维,起到抛砖引玉的作用。

本书所论及的研究领域,如暂态稳定域、小干扰稳定域、动态安全域和电压稳定域等,涉及到了许多动力系统的理论知识;而电力系统小干扰功角稳定与电压稳定、电力系统鲁棒稳定性等,又涉及到很深入的多变量反馈系统的理论知识,这些知识在大电力系统稳定性机理的认识和新解析工具的开发中极其重要,为了便于读者阅读,特在第一章和第六章扼要地给予介绍,在正文的某些地方又加了适当的注释,以期起到架桥、铺路的作用。

本书作者多年来一直从事电力系统安全性与稳定性的研究,先后完成了国家教委博士学科点专项基金资助的“电力系统静态和动态安全域的研究”项目并获国家教委1993年科技进步奖一等奖、国家自然科学基金资助的“电力系统鲁棒稳定性的研究”和“中长期电压稳定监控中域的方法及协调分布式处理策略”两个研究项目,以及国家自然科学基金青年科学基金资助本书第二作者的“基于结构保留模型的电力系统鲁棒稳定性分析理论”项目。书中也总结和概括了他们的研究成果。由于该领域是一个新兴的、不断发展的研究领域,所以书中的内容还有待于在今后的研究及实践中进一步充实、完善和提高。在此,作者对国家教委和国家自然科学基金委表示由衷的感谢,没有他们的专项基金的支持,要想顺利地开展如此广泛而深入的应用基础性的理论研究并取得系统性的成果是很难想象的。

本书共分三篇十四章,其中第一篇(第一至第五章)、第三篇(第十一至第十四章)和附录A、B、D由余贻鑫教授执笔,第二篇(第六至第十章)和附录C由王成山教授执笔,全书由余贻鑫教授统稿。

李国庆教授和贾宏杰博士生仔细地通读了全稿并参与了部分章节稿件的编写以及与科学出版社之间合作的大量工作,他们的努力大大提高了本书的出版质量。特别要提到的是冯飞、栾文鹏、林济铿,他们在学期间的博士论文和硕士论文为撰写本书提供了充分的材料。在本书的撰写过程中,还得到美国加州大学(伯克利)Felix F. Wu教授,华盛顿大学(西雅图)C. C. Liu教授,康乃尔大学H. D. Chiang教授,清华大学高景德教授、卢强教授、韩英铎教授,华北电力大学杨以涵教授,浙江大学韩祯祥教授,电力工业部南京自动化研究院薛禹胜教授,以及天津大学贺家李教授、黄纯华教授的关心、支持与帮助。天津大学电力系和天津大学科学图书馆为本书的撰写提供了良好的条件。作者向他们一并致以深切的谢意。

由于作者学识有限,书中不妥之处恳请读者不吝赐教。

作 者

1997年10月于天津大学逸夫楼

常用符号

本书涉及到大量专用符号,这些符号在各章节及附录中将分别予以说明,下面所给出的仅是贯穿全书的常用符号.

\mathbf{A}	矩阵
\mathbf{x}, \mathbf{u}	向量
$\mathbf{0}$	零向量,零矩阵
$\mathbf{1}, \mathbf{I}$	幺向量,幺矩阵
\bar{V}, \bar{I}	复电压、复电流
\dot{V}, \dot{I}	\bar{V}, \bar{I} 的共轭
$(d/dt)\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$	向量 \mathbf{x} 的一阶导数
$(\partial/\partial \alpha)\mathbf{x}(\theta, t)$	\mathbf{x} 对 t 的偏导数
$\det \mathbf{A}$	矩阵 \mathbf{A} 的行列式
$\mathbf{J}(\mathbf{x})$	雅可比矩阵
$\frac{\partial(y_1, \dots, y_n)}{\partial(x_1, \dots, x_n)}$ 或 $Df(\mathbf{x})$	雅可比矩阵或线性向量场
$\{x_n\}$	集合
$\{x P\}$	具有性质 P 的集合
\sum	求和
$ z $	z 的绝对值或欧几里得范数 $\ \cdot\ _2$
$\ \cdot\ $	范数
\lim	极限
\mathbf{A}^T	矩阵 \mathbf{A} 的转置
\mathbf{A}^{-1}	矩阵 \mathbf{A} 的逆
$(\mathbf{A})^*$	矩阵 \mathbf{A} 的共轭转置
$\operatorname{Re}(\bar{V})$	复数 \bar{V} 的实部
$\operatorname{Im}(\bar{V})$	复数 \bar{V} 的虚部
$\exp x, e^x$	x 的指数
\triangleq	定义符号
\square	定理证毕
\dim	维数
$I_n(\mathbf{A})$	矩阵 \mathbf{A} 的惯性
∇V	$\operatorname{grad} V(x_1, \dots, x_n) = (\partial V/\partial x_1, \dots, \partial V/\partial x_n)$
$\mathcal{L}(y)$	y 的拉普拉斯变换
$\angle f(j\omega)$	$f(j\omega)$ 的相位角
$\operatorname{Tr} \mathbf{A}$	矩阵 \mathbf{A} 的迹
$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$	\mathbf{a} 向量和 \mathbf{b} 向量的内积

目 录

第一篇 暂态稳定分析中域的方法	1
引言	1
第一章 动力系统基础知识	3
1.1 平衡点的稳定性	3
1.1.1 非线性收点	3
1.1.2 平衡点的稳定性	6
1.1.3 李雅普诺夫函数	7
1.1.4 梯度系统	13
1.2 平衡点的分岔	15
1.2.1 结构稳定性	16
1.2.2 中心流形定理	17
1.2.3 平衡点路径的局部分岔的示例	18
1.2.4 双曲平衡点稳定性的类型	21
1.2.5 鞍点和不变流形	24
第二章 电力系统暂态稳定分析的数学模型及其拓扑性质	30
2.1 暂态稳定问题的一般数学描述	30
2.2 稳定边界	32
2.3 电力系统经典模型	35
2.4 电力系统经典模型的拓扑性质	38
2.5 电力系统结构保留模型(I)(三种著名的形式)	42
2.5.1 Bergen-Hill 模型(简记为 B-H 模型)	42
2.5.2 Narasimhamurthi-Musavi 模型(简记为 N-M 模型)	44
2.5.3 Tsolas-Arapostathis-Varaiya 模型(简记为 T-A-V 模型)	45
2.6 电力系统结构保留模型(II)(一般的状态空间表达式)	47
2.6.1 系统模型	48
2.6.2 退化的系统方程	50
2.6.3 增广系统方程	52
2.6.4 增广系统的李雅普诺夫函数	52
2.6.5 可供选择的李雅普诺夫函数的形式	54
2.7 结构保留模型的拓扑性质	55
2.8 电力系统暂态稳定准则	58
2.8.1 最接近的 UEP 法	59
2.8.2 相关的 UEP 法	61
2.9 不稳定模态	62
2.10 使用结构保留能量函数的电力系统暂态稳定分析示例	63
2.10.1 模型	63

2.10.2	结构保留的能量函数	65
2.10.3	稳定域的计算	66
2.10.4	数值例子	67
2.11	小结	71
第三章	电力系统暂态稳定分析 PEBS 法的理论基础及 BCU 法	73
3.1	引言	73
3.2	广义梯度系统的稳定域	77
3.3	二阶动力系统的稳定域	80
3.4	$d(\bar{\mathbf{D}})$ 和 $d(\mathbf{M}, \mathbf{D})$ 的平衡点之间的关系	82
3.5	PEBS 法的分析	84
3.6	BCU 法	90
3.7	小结	92
第四章	割集稳定准则	94
4.1	割集脆弱性指标	95
4.1.1	模型	95
4.1.2	割集脆弱性指标	97
4.2	临界割集与割集稳定准则	100
4.2.1	临界割集	100
4.2.2	割集稳定准则	100
4.2.3	稳定性评价的算法	101
4.2.4	示例	102
4.3	决定临界割集的最大流最小割算法	106
4.3.1	临界能量的近似形式	107
4.3.2	稳定极限的确定	108
4.3.3	实施中的一些考虑	109
4.3.4	确定稳定极限的算法	109
4.3.5	示例	110
4.4	临界割集与 1 型相关不稳定平衡点间的定量关系	112
第五章	电力系统动态安全域	113
5.1	电力系统功率注入空间的动态安全域	113
5.1.1	数学模型和基本概念	114
5.1.2	暂态稳定域的近似描述	115
5.1.3	事故期间微分方程的线性化	116
5.1.4	动态安全域的实用性质	116
5.1.5	用超平面近似模拟 DSR 边界	117
5.1.6	算例	118
5.2	临界割集动态安全域	120
5.2.1	临界割集动态安全域的定义	120
5.2.2	临界割集动态安全域的计算和应用	121
5.3	电力系统失稳模态的识别	122
第二篇	小扰动稳定性分析	127

引言	127
第六章 多变量系统稳定性分析的现代频域法	129
6.1 线性定常系统的数学描述	129
6.1.1 输入-输出描述	129
6.1.2 状态变量描述	130
6.2 组合系统的传递函数矩阵	132
6.3 传递函数矩阵的极点和零点	133
6.4 反馈系统的稳定性	134
6.5 多变量奈魁斯特稳定性准则	138
6.6 频域分析中的奇异值分解法	142
第七章 结构保留多变量频域反馈模型	145
7.1 引言	145
7.2 基本模型	146
7.2.1 发电机相关方程	146
7.2.2 负荷相关方程	150
7.2.3 网络方程式	151
7.2.4 基本框图	151
7.3 结构保留反馈模型	155
7.3.1 框图互联反馈模型	155
7.3.2 区域子系统互联反馈模型	157
7.3.3 节点互联反馈模型	158
7.4 模型的基本性质分析	159
7.5 传递函数矩阵的互质多项式矩阵分解	162
7.6 扩展模型	164
7.6.1 发电机定子和转子方程	164
7.6.2 网络方程式	166
7.6.3 模型描述	168
第八章 电力系统小扰动稳定性分析	171
8.1 引言	171
8.2 小扰动稳定性准则	172
8.3 分散型小扰动稳定性准则	174
8.3.1 基本定理	174
8.3.2 基本问题分析	176
8.3.3 示例	178
8.4 结构保留模型极点分析	180
8.4.1 闭环主导极点的振荡频率和衰减常数的估计	181
8.4.2 机械振荡模式的频率分布	182
8.4.3 发电机和闭环极点关联特性	185
第九章 电力系统鲁棒稳定性分析	188
9.1 模型不确定性的描述	188
9.1.1 加法型和乘法型扰动描述方法	189

9.1.2	分式型扰动描述方法	190
9.2	代数鲁棒稳定性检验准则	191
9.2.1	单一子系统具有不确定性	192
9.2.2	多个子系统具有不确定性	195
9.2.3	应用	196
9.3	范数鲁棒稳定性分析准则	198
9.3.1	基本准则	198
9.3.2	部分子系统具有不确定性的特殊准则	201
9.3.3	电力系统稳定器的鲁棒稳定性评估	204
9.3.4	次同步谐振现象的鲁棒稳定性分析	205
第十章	电力系统小扰动稳定域	213
10.1	引言	213
10.2	多机电力系统模型的状态空间描述	216
10.2.1	模型的数学描述	216
10.2.2	模型的基本性质	218
10.3	电力系统小扰动稳定性准则	221
10.4	静态安全域的小扰动稳定性	223
10.5	小扰动稳定域的性质	226
10.5.1	开集性质及对称性	226
10.5.2	连通性	228
10.5.3	不连通域数目的有限性	230
10.5.4	唯一性	231
第三篇	电力系统的电压稳定性	235
引言	235
第十一章	电压稳定性的基本概念	236
11.1	定义	236
11.2	实际考察与慢动态	236
11.2.1	幅射状系统	236
11.2.2	局部无功短缺	238
11.2.3	级联效应 Cascading	239
11.2.4	长传输线和静态稳定性	240
11.2.5	现行的分析方法	240
11.3	邻近电压崩溃的指示	244
11.3.1	基于潮流解的邻近电压崩溃指示 VCPI	244
11.3.2	基于一般潮流解的电压稳定性指标 L_i	244
11.3.3	基于解对的邻近电压崩溃的指示 VIPI	246
11.3.4	电压稳定控制区	247
11.3.5	雅可比矩阵最小奇异值检验	247
11.4	研究电压不稳定现象的三种时间框架	249
11.4.1	场景/时间框架 1——暂态电压稳定性	250
11.4.2	场景/时间框架 2——经典电压稳定性	250

11.4.3 场景/时间框架 3——长期电压不稳定性	252
11.5 改善电压稳定问题的技术	254
11.6 小结	255
第十二章 简单电力系统中的动态电压崩溃	256
12.1 电压稳定域与经典时间框架下的电压崩溃	256
12.1.1 模型	256
12.1.2 动态机制	258
12.2 基于感应电动机动态方程的电压崩溃过程分析	261
12.3 中心流形电压崩溃模型	264
12.4 详细发电机模型下的电压稳定性与最大负荷能力	267
12.5 动态负荷模型	272
12.6 电压稳定性分析中的能量函数法	275
12.6.1 静态电压稳定的能量函数测度	275
12.6.2 统一的能量函数框架	276
12.7 可行域	281
第十三章 电力系统的电压稳定域与经典时间框架下的电压崩溃	283
13.1 网络方程	283
13.2 负荷动态对电压稳定性影响的分析	285
13.2.1 平衡点的性质	286
13.2.2 电压稳定域的构造	289
13.2.3 电压崩溃域	290
13.3 有载调压变压器和发电机励磁的作用	291
13.3.1 有载调压变压器的作用	291
13.3.2 发电机无功容量的作用	292
13.4 电压崩溃的其他问题	294
13.4.1 把闭锁有载调压变压器作为一种控制	294
13.4.2 有功潮流的作用	295
13.5 示例	295
13.6 小结	301
第十四章 电压稳定性测度与模型的综合分析	303
14.1 综合分析的一般性模拟	303
14.2 分岔分析	304
14.3 灵敏度分析	306
14.4 非线性动态方法	307
14.5 样板系统模型和邻近性测度的比较	309
14.6 小结	314
附录 A 符号表	316
A.1 数学符号	316
A.1.1 集合符号	316
A.1.2 代数符号	316

A. 1. 3	简写符号	317
A. 1. 4	解析中同函数有关的概念及称呼	317
A. 2	电力系统符号	317
A. 2. 1	简写符号	317
A. 2. 2	集合符号	317
A. 2. 3	下角标符号	318
A. 2. 4	上角标符号	318
A. 2. 5	一般符号	318
附录 B	基于直接法的动态安全性指标的比较	321
B. 1	模型与直接法概念的再描述	322
B. 2	吸引域 RA 与近似吸引域 ARA 的再描述	327
B. 3	直接法的概括	328
B. 4	行为指标的型式	331
B. 4. 1	能量型行为指标的综合比较(表 B. 2. 0)	331
B. 4. 2	势能分量的比较(表 B. 2. 1—B. 2. 4)	332
B. 5	门限	337
B. 5. 1	引言	337
B. 5. 2	独立于轨迹的方法的门限	340
B. 5. 3	依从于轨迹法的门限	342
B. 6	系统模型	344
B. 7	结论	347
附录 C	多项式和有理函数矩阵	350
C. 1	多项式	350
C. 2	多项式矩阵	350
C. 3	有理函数矩阵	353
附录 D	稳定平衡点的唯一性和两个预备定理	355
D. 1	稳定平衡点的唯一性	355
D. 2	两个预备定理	355
参考文献	357

第一篇 暂态稳定分析中域的方法

引 言

电力系统中常常发生大扰动,如母线上负荷或发电机功率的突变,或由于事故和线路切合而造成的输电系统图形的突变。在电力系统规划和运行中所关心的是,扰动出现后系统继续满足负荷需求的能力。这种能力,在规划中被称为**可靠性**,在运行中则被称为**安全性**。出于经济上的以及其他方面的考虑,规划分析中的苛刻的可靠性准则是很难满足的,致使作为第二道防线的安全性分析在保证供电质量上变得日益重要。

就扰动之后的很短时间而言,人们所关心的是系统达到可接受的稳态运行条件的能力,称之为**暂态稳定性**。如果系统承受住了扰动最初的影响,则人们进一步关心的就是电网中发电和负荷需求的平衡,这是稳态潮流分析问题。暂态稳定分析和稳态潮流的研究这两者都已被广泛地用于目前电力系统规划的可靠性分析中。然而目前的在线安全性分析中却只进行稳态潮流分析。这是因为目前广泛使用的暂态稳定分析方法乃是时域的数值仿真。现有的计算机程序能够处理 2 000 条母线和 300 台具有详细模型的发电机。在典型情况下,一个方案可能需要进行 10 次至 40 次的仿真计算,而做一次仿真大约需若干分钟。所以仿真法不能直接用于在线安全性分析。对在线安全分析能做出重大贡献的方法之一,是暂态稳定分析的李雅普诺夫直接法,特别是能量函数法。这将是本篇的主要内容。

鉴于在大学阶段的学习中读者就已经接触到关于暂态稳定性的许多基本概念,所以本篇将从第 2.1 节的暂态稳定分析的一般性数学描述开始直接进入暂态稳定分析直接法的叙述。

直接法早期的研究工作中所使用的是网络简化模型和所谓的最接近的不稳定平衡点法。使用最接近的不稳定平衡点法时常使所得结果过于保守,为了减小这些保守性已提出了相关不稳定平衡点法和势能界面法。这些概念与方法将在本篇第二章中介绍。

网络简化模型时常被称为**经典电力系统模型**。在该模型中负荷用恒定阻抗表示,并把网络简化成仅含发电机内节点的网络。它很简单,但无法抓住与扰动类型相关的一些重要特性,不能计及电压的变化和无功潮流的影响。为了克服网络简化模型的缺陷,自 80 年代初开始已提出了结构保留模型,其中负荷的模拟更符合实际而不再使用阻抗模拟,网络也不再化成只含发电机内节点,从而使负荷节点的特性得以计及。关于使用结构保留模型的电力系统暂态稳定分析直接法也将在本篇第二章介绍。

暂态稳定分析直接法的研究工作大多是基于启发式和仿真的,仅是近几年才提供了比较完整的理论基础,这些理论基础将在本篇第三章介绍,这些理论应用的一个成功的例子是对势能界面法的改进,即所谓的 BCU 法。

直接法的研究已取得了很大进展,已具有工程实用价值,其临界清除时间的保守性误

差一般小于 10%，已可作为动态安全性分析中的预想事故选择^[2]的有力工具，可是当把它直接用于在线安全分析时，它有两个明显的弱点：其一是它所给出的仅是充分条件，而非必要且充分条件，保守性无法避免，而且在使用详细的发电机与负荷动态模型上仍有困难；其二是它所给出的是个临界清除时间，而临界清除时间在已存在的系统中没有直接的实用价值，因为在这些系统中故障的清除时间已经确定。在动态安全分析中最有使用价值的是事故前注入空间的动态安全域。正如本篇第二至四章所讲过的，暂态稳定分析的直接法也可划归“域”的方法，因为它是在事故后的状态空间上识别保证扰动后暂态稳定性的点的区域。但该域仅同事故前注入功率空间的一个点一一对应，所以从分析注入功率空间上点的安全性的角度看，它还是“逐点法”。本篇第五章介绍了有关注入空间动态安全域的研究成果。这些安全域可以离线计算，在线使用。因为是离线计算，所以可以使用精确模型的仿真法计算，从而可避免直接法所具有的保守性。把它用于大系统的研究工作还在进行中。

近年来，电压稳定性与电压崩溃的研究已成为一个独立的研究专题，日益受到重视，鉴于读者一般较少掌握这方面的知识，本书将另辟一篇(第三篇)进行叙述。

本篇的第一章介绍了动力系统的理论基础，为了弄清本篇及后续两篇中的有关数学概念，读者需要具备这些基本知识但并不要求每位读者都从这一章读起，对已具有一定基础的读者可以直接从第二章读起。在本书末的附录 B 中，从动态安全性指标的角度出发，对现有使用稳定域的概念的各种直接法进行了系统的综合比较，相信它会有助于读者对文献中所论述的各种方法进行评价与总结。