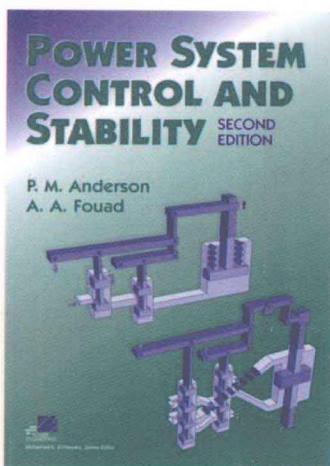


电气工程、自动化专业规划教材



电力系统控制与稳定 (第二版)

Power System Control and Stability
Second Edition



【美】

P. M. Anderson

A. A. Fouad

王奔

著
译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电气工程、自动化专业规划教材

电力系统控制与稳定

(第二版)

Power System Control and Stability

Second Edition

[美] P. M. Anderson 著
A. A. Fouad

王 奔 译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

这是一本在电力系统控制与稳定性领域享誉国际的经典专著。本书由三部分组成。第一部分首先讨论电力系统稳定性的定义和要求；然后给出发电机元件的各种经典模型；最后介绍电力系统对小扰动的响应。第二部分以电磁转矩为核心，首先针对发电机模型的状态空间表达式，介绍派克变换、标么值、等效电路、各个时间常数及更一般的发电机模型。然后，分别从模拟计算机和数字计算机的角度阐述单机无穷大系统和多机系统的仿真方法；接下来，讨论同步发电机模型的线性化问题，详细介绍励磁系统并讨论励磁系统对电力系统稳定性的影响；最后深入探讨带恒定阻抗负荷的多机系统内部的数学关系。第三部分以电力系统稳定性为目的来讨论机械转矩，首先概述发电机转速调节特性和方式，然后分别详细介绍汽轮机、水轮机、燃气轮机及联合循环发电机的数学模型和调节特性。为读者进一步深入地理解本书所讨论的有关问题，作者配有近百页的附录。

本书强调对实际问题本身的理解，所涉及的数学问题或控制理论基础并不复杂，仅有自动控制原理和初步的线性系统状态方程的背景知识就能理解全书的数学模型。本书适合于作为电力系统自动化专业的高年级本科生或研究生的教材，也适合于作为电力系统自动化各领域的学者和工程师的参考书。

Power System Control and Stability, Second Edition. ISBN: 978-0-471-23862-1. P. M. Anderson, A. A. Fouad
Original English Edition Copyright © 2003 by Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.
This translation published under license.

Authorized Translation of the Edition published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc. Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体版专有出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2011-4143

图书在版编目(CIP)数据

电力系统控制与稳定：第2版/(美)安德森(Anderson, P. M.)，(美)福阿德(Fouad, A. A.)著；王奔译。

北京：电子工业出版社，2012.5

书名原文：Power System Control and Stability

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-16748-5

I. ①电… II. ①安… ②福… ③王… III. ①电力系统—自动控制—高等学校—教材 IV. ①TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第070038号

策划编辑：冯小贝

责任编辑：冯小贝 特约编辑：王 崧

印 刷：

装 订：北京中新伟业印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：31.5 字数：909千字

印 次：2012年5月第1次印刷

定 价：98.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010)88258888。

译者序

经典不老！本书是电力系统控制与稳定性领域蜚声国际的经典专著，从第一版出版至今已有 30 多年（现为第二版），一直畅销不衰。

本书的前九章，已于 20 世纪 70 年代后期在我国出版中文版。当译者于 1978 年在武汉水力电力学院电力系读本科时，学校就采用该译本作为教材，使译者对电力系统控制与稳定性问题建立了初步的概念。1996 年，译者在华南理工大学自动化系攻读博士学位，在博士论文中，涉及多机系统的仿真问题，曾采用该书的九节点模型及参数搭建仿真平台。在随后的教学和科研中，本书英文版常伴左右，且常读常新。与同行和同事的交流中，大家也时常提及本书，且与译者有同样的感受。因此，译者萌发了翻译本书，将这部卓越的学术专著介绍给国内广大读者的想法。

电力系统稳定性问题，通常分为两大类：功角稳定性和电压稳定性。功角稳定性又大致分为静态稳定性和暂态稳定性（若进一步分类，还包含低频振荡和次同步振荡等），其核心都是围绕转子运动方程来展开的。按照扰动大小对平衡工作点的影响，静态稳定性问题和动态稳定性问题的主要区别在于对数学模型的处理方式不同，大体上可归结为局部线性化方法的有效性问题。近 20~30 年来，电力系统稳定性问题得到了长足的发展。从控制方面而言，有基于模型的控制，包括线性控制、非线性控制、自适应控制、鲁棒控制及变结构控制等；还有非基于模型的控制，包括模糊控制、人工神经网络控制、专家系统及人工智能等；当然，也包括各种控制方法的结合。从控制位置和手段来看，除了传统的发电机励磁控制和调速控制以外，还有在传输线上的各种柔性交流输电控制手段。其目的只有一个，即更有效地实现长距离、大功率传输的现代大电网的稳定安全运行。

本书是经典的电力系统控制与稳定性专著。由转子运动方程可以看出，最有效的（事实上，也是最传统的）控制电力系统稳定的手段是通过励磁机和调速器来实现的。所以，本书系统地阐述了通过发电机励磁和调速控制手段来实现电力系统稳定性的问题。针对所介绍的各种模型，采用传统控制方法的根轨迹法和线性系统方法来深入分析电力系统模型的稳定性问题，并配有大量的例题和习题及实际发电机参数等，以使得读者能全面地理解所阐述的问题，并为今后的学习、研究和实际工作打下坚实的基础。已学习过自动控制原理和电力系统分析课程后的本科生，掌握本书所涉及的概念和方法并不困难。

译者在武汉水利电力学院电力系读书时，非常有幸师从陈允平教授。在随后 20 多年的学习工作中，深得陈允平教授的指导和关怀，使我在电力系统专业的职业生涯中受益匪浅。可惜陈允平教授英年早逝，在本书的翻译工作完成之际，借此表达对他的深切缅怀和感激之情！

翻译的目的在于语言转换，使得读者可以全身心地专注于书籍本身的内容，而不必分心于不太熟悉的非母语语言。由此，在翻译中不但力求保持本书的原貌，而且把书中的各种代词尽可能用名词表达，除非特别明显的代词；而且尽量把书中的长句翻译成几个短句，以使得读者一目了然。

本书的翻译过程中，参考了 20 世纪 70 年代翻译出版的本书的前 9 章，在此向前辈学者们表示衷心感谢！

尽管竭尽全力，费时一年，但仍常常感到力不从心。因此，不当、不贴切甚至有误之处也许难免，诚恳地欢迎各位专家学者给予批评指正，以便再次印刷时更正。联系地址：rushing_wang@163.com。

前 言

本书的一些早期版本作为我们的授课教材，至今已过了整整 30 年；其后正式出版的第一版，也已过了四分之一世纪。通常，作为一本过时的书，读者应该会放弃它。但直到最近，仍然有很多读者会问，在这一版本中，增加了什么新内容？特别是新读者会关心：第二版何时出版？

30 年来，在稳定性研究中，所分析电力系统的容量、研究范围（包括所寻求答案的类型）、暂态分析的持续时间及求解问题的方法可能都发生了变化，但所有这些问题的核心是：必须采用适当的系统数学模型。在暂态分析中，这类模型必须基于物理系统的描述与行为。

为进行机电暂态分析，本书专注于电力系统各元件的建模，还会着重于惯性暂态的分析。一个可能的例外反映了本书成书时的一个关注点，即为发现和缓解可能存在的欠阻尼运行情况所做的线性系统模型的分析。

20 世纪 70 年代以后，有几个趋势引起了电力系统工程师对稳定性问题的极大关注。由于较高的经济成本和传输系统的延时，加之环境诉讼，导致大型电力系统在传输上变得更为拥挤，在结构上更加相互依赖，等等。为维持稳定性，一直以来，人们更依赖于离散补偿控制、大型系统的研究需要及较长暂态时间的分析。所以，自 20 世纪 70 年代以后，在稳定性研究中要求包含如下附加模型：汽轮机调速器、发电厂、离散补偿控制等。这样，为电力系统元件建模则要求附加上机械转矩，这个问题比以往变得更为重要。作者认为，现在就应该满足这个要求，正如最初所计划的那样。

现在，电力工业正在进行重要的重建。现在的问题是，自 20 世纪 70 年代开始的这一重建趋势是否可能还在继续，至少持续到一个不久的未来？许多电力系统分析者认为，答案是肯定的。

自从本书的修订版出版后，电力工业已经经历了有效的重建，大型电力跨区域传输应用更为广泛。可以期待，新的工程重点将着重于工程师们所称的中期或长期分析。我们相信，在重建电力环境中，继续这类分析是必要的，因为这将会更加强调对包含在各种运行方式及跨区传输中的所有问题的各种系统限制所能提供的答案。在指导这些研究中，机械转矩的建模将更加重要。

出现在第 10 章至第 13 章和附录 F 至附录 J 中的“机械转矩”的内容，由 Paul Anderson 撰写，这些内容如果存在问题需要更正，或是有其他疑问，请与 Paul Anderson 联系。这些内容出现在一本关于电力系统稳定性和控制的书中不太常见，但我们认识到，稳定性的完整展现和所支撑的数学模型，不涉及这些重要系统元件的讨论是不可能完整的。这里给出的模型可以认为是“低阶”模型，对电力系统稳定性研究而言是适当的附加材料。这就将模型限定为 1 分钟左右的短时间跨度模型，有目的地避免了发电厂长期行为的建模，例如在经济或能量调度研究中。

P. M. Anderson

A. A. Fouad

*San Diego, California
Fort Collins, Colorado*

目 录

第一部分 引言

第 1 章 电力系统稳定性	2	2.8 等面积准则	22
1.1 引言	2	2.9 多机系统的经典模型	24
1.2 可靠电力服务的要求	2	2.10 一个九母线系统的经典稳定性研究	26
1.3 问题的陈述	3	2.11 经典模型的不足	32
1.4 冲击对系统元件的影响	5	2.12 单机的框图	33
1.5 仿真方法	6	习题	34
习题	8	参考文献	36
第 2 章 基本数学模型	9	第 3 章 小扰动引起的系统响应	37
2.1 摇摆方程	9	3.1 引言	37
2.2 单位制	10	3.2 所研究问题的类型	37
2.3 机械转矩	12	3.3 无调节的同步发电机	38
2.4 电磁转矩	14	3.4 无调节多机系统的振荡方式	41
2.5 同步发电机的功角曲线	15	3.5 有调节的同步发电机	46
2.6 同步发电机振荡的固有频率	17	3.6 冲击功率的分布	49
2.7 单机与无穷大母线连接的系统—— 经典模型	18	习题	57
		参考文献	58

第二部分 电磁转矩

第 4 章 同步发电机	60	4.16 汽轮发电机的动态模型	107
4.1 引言	60	习题	109
4.2 Park 变换	60	参考文献	111
4.3 磁链方程	61	第 5 章 同步发电机的模拟	113
4.4 电压方程	64	5.1 引言	113
4.5 状态空间方程的形式	66	5.2 稳态方程和相量图	113
4.6 电流公式	66	5.3 经过一条传输线连接至无穷大母线的 发电机	115
4.7 标幺值变换	67	5.4 在机端接有局部负荷的连接至无穷大母线的 发电机	116
4.8 电压方程的规格化	72	5.5 确定稳态条件	118
4.9 矩阵方程的规格化	75	5.6 例题	120
4.10 转矩和功率	77	5.7 多机系统的初始条件	125
4.11 同步发电机的等效回路	79	5.8 用制造商的数据来确定发电机的参数	126
4.12 磁链的状态空间模型	80	5.9 同步发电机的模拟计算机仿真	129
4.13 负荷方程	84		
4.14 次暂态电感、暂态电感和时间常数	90		
4.15 同步发电机的简化模型	94		

5.10 同步发电机的数字仿真	139	8.2 励磁对发电机功率极限的影响	239
习题	159	8.3 励磁系统对暂态稳定性的影响	242
参考文献	160	8.4 励磁对动态稳定性的影响	246
第6章 同步发电机的线性模型	161	8.5 有调节的发电机连接至无穷大母线的根轨迹分析	250
6.1 引言	161	8.6 近似的系统描述	255
6.2 发电机状态空间电流模型的线性化	161	8.7 辅助稳定信号	259
6.3 单机问题的负荷方程的线性化	164	8.8 稳定的发电机的线性分析	263
6.4 磁链模型的系统化	167	8.9 模拟计算机研究	265
6.5 简化的线性模型	171	8.10 数字计算机对暂态稳定的研究	269
6.6 框图	178	8.11 励磁系统对稳定性影响的一般性评述	277
6.7 简化模型的状态空间表示	179	习题	279
习题	179	参考文献	280
参考文献	180	第9章 具有恒定阻抗负荷的多机系统	282
第7章 励磁系统	181	9.1 引言	282
7.1 励磁控制概述	181	9.2 问题的阐述	282
7.2 控制的结构	182	9.3 无源网络的矩阵表示法	283
7.3 典型的励磁结构	183	9.4 将发电机坐标转换到系统参考系	286
7.4 励磁控制系统的定义	189	9.5 发电机的电流和电压之间的关系	286
7.5 电压调节器	194	9.6 系统的阶数	289
7.6 励磁机电压的建起	197	9.7 经典模型表示的发电机	289
7.7 励磁系统响应	205	9.8 网络的线性化模型	292
7.8 励磁系统的状态空间描述	218	9.9 混合公式	295
7.9 励磁机系统的计算机描述	224	9.10 具有磁链模型的网络方程	297
7.10 典型的系统常数	230	9.11 完整的系统方程	298
7.11 励磁对发电机性能的影响	233	9.12 多机系统的研究	299
习题	234	习题	304
参考文献	235	参考文献	304
第8章 励磁对稳定的影响	238		
8.1 引言	238		

第三部分 机械转矩电力系统控制与稳定性

第10章 转速调节	306	第11章 汽轮原动机	327
10.1 飞球调速器	308	11.1 引言	327
10.2 同步调速器	311	11.2 电厂控制方式	328
10.3 涡轮机的增量方程	312	11.3 热力发电	330
10.4 降速调速器	315	11.4 蒸汽动力发电厂模型	332
10.5 浮动杠杆降速调速器	319	11.5 汽轮机	333
10.6 补偿型调速器	320	11.6 汽轮机的控制运行	338
习题	325	11.7 汽轮机控制功能	339
参考文献	326	11.8 蒸汽发生器控制	349

11.9 矿物燃料锅炉	350	第 13 章 燃气轮机和联合循环发电厂	387
11.10 核能蒸汽供应系统	361	13.1 引言	387
习题	363	13.2 燃气轮机原动机	387
参考文献	364	13.3 联合循环原动机	390
第 12 章 水轮原动机	366	习题	396
12.1 引言	366	参考文献	397
12.2 冲击式涡轮机	366	附录 A 三相系统的三角恒等式	398
12.3 反作用式涡轮机	368	附录 B 解微分方程的某些计算机方法	399
12.4 螺旋桨式涡轮机	369	附录 C 规格化	409
12.5 Deriaz 式涡轮机	370	附录 D 典型的系统数据	416
12.6 导水管、浪涌槽和引水管	370	附录 E 励磁控制系统的定义	439
12.7 水力系统方程	375	附录 F 控制系统元件	445
12.8 水力系统传递函数	379	附录 G 压力控制系统	459
12.9 简化假设	382	附录 H 调速器方程	464
12.10 水力系统框图	384	附录 I 导水管的波方程	471
12.11 泵送存储水力系统	384	附录 J 液压伺服电动机	478
习题	385	索引	486
参考文献	386		

第一部分 引言

P. M. Anderson

A. A. Fouad

第 1 章 电力系统稳定性

第 2 章 基本数学模型

第 3 章 小扰动引起的系统响应

第1章 电力系统稳定性

1.1 引言

工业革命以来，人们对能量消费的需求一直在稳步地增长。1888年，尼古拉·特斯拉发明了感应电动机，标志了电能工业及人工照明中日益增长的重要性。现代社会能量需求的主要部分是以电能的形式供给的。

工业发展的社会需要持续增长的电力供应，在北美大陆的电力需求每十年翻一番。人们已经构建了十分复杂的电力系统来满足这个不断增长的需求。电力建设的这一趋势正朝着构建一个互连的传输网络发展，这个互连电力网络连接发电机与负荷，构成庞大的相互协调的系统，其中有些系统横跨整个北美大陆。的确，在美国和加拿大，远离数千英里的发电机正在并网运行。

这类提供电能的大型企业存在许多工程问题，给工程师带来了各种挑战。这类系统的规划、建设和运行变得极其复杂。一些问题激发了工程师的管理天才；而另一些问题则需要工程师在系统设计中的知识和经验。完整的设计必须在自动控制的基础上预测，而不是在人工操作员的缓慢响应中预测。为了能够预测这类复杂系统的行为，迫使工程师寻求强有力的分析和综合工具。

本书关注设计问题的某些方面，特别是互连电力系统的动态行为。一个系统在正常运行条件和扰动情况下，各个元件的特性都将受到检验。对整个系统行为的影响也将做出分析。要强调的是，系统的暂态行为由常微分方程组以数学的方式描述。

1.2 可靠电力服务的要求

一个系统的成功运行主要取决于工程师的能力，这个能力体现在为负荷提供可靠的及无扰动的服务。电力供应可靠性的意义远不止是可用的。理想情况下，必须在所有时间段内为负荷提供恒定的电压和频率。用专业术语来说，这意味着，电压和频率必须保持在紧误差范围内，以使得消费者的设备能满意地运行。例如，电压下跌10%~15%或者频率降低仅仅几赫兹，就可能导致系统中的电动机失速。因此，可以说，电力系统运行人员必须维持非常高的持续电力服务的标准。

可靠服务的第一个要求是，发电机组并行运行且带有足够的容量以满足负荷的需求。如果在任何时候，一台发电机与系统内其他发电机之间丧失同步，就可能发生明显的电压和电流振荡，则在非期望的位置，继电器可能自动地跳闸以断开传输线。如果一台发电机从系统分离，假设导致失步的扰动并未损害这台发电机且它的原动机也未关闭，则它必须再同步，然后才能带负荷。

在正常条件下，同步发电机并不易失去同步。如果一台发电机趋于加速或减速，同步力矩将趋于使该发电机保持同步。尽管如此，当条件变化时，在这些新条件下，运行使得一台或多台发电机保持同步力矩并不够，因为在系统中小的冲击就可能使这些发电机失去同步。对系统的一个大冲击也可能导致一台或多台发电机失去同步。

可靠服务的第二个要求是，保持电力网的完整性。高压传输系统连接着发电站和负荷中心。在这个网络中的扰动将可能阻碍功率潮流流向负荷。这就要求对广大的地理区域进行研究，因为几乎所有的电力系统都与邻近系统互连。经济功率及备用功率也可能流入连接联络线以帮助维持服务的连续性。因此，如果可靠功率能在系统的区域之间进行交易，那么系统的成功运行就意味着这些线路必须保持畅通服务。

通常，可以很轻松地提到电力系统在“稳态”下运行，事实上，在真正的意义上，这个状态永远

不会出现。负荷的随机变化在任何时候都在发生，随后，才出现发电机的调节。因此，大的变化的确不时出现，例如，网络中的一个故障，一台设备的故障，一台大型设备的突然投入，一条线路或一台发电机跳闸。我们可以把这些状况视为从一个平衡状态到另一个平衡状态的变化。可以说，成功的运行仅仅要求新的状态是一个“稳定的”状态（无论那意味着什么）。例如，如果一台发电机出现了故障，那么连接至电网中的其他发电机必须要有足够的容量来满足负荷需求；或者，一条线路丧失了，它所传输的功率就必须可从其他路径获得。遗憾的是，这个观点在一个重要方面是错误的：它忽略了从一个平衡状态到另一个平衡状态之间过渡过程的动态行为。在这个过渡过程期间，很可能频繁地失去同步性，或者，在一条传输线上出现逐渐增大的振荡，最终导致线路跳闸。这些问题，必须由电力系统工程师研究，且归属于“电力系统稳定性”范畴。

1.3 问题的陈述

稳定性问题是与同步发电机遭受扰动后的行为密不可分的。如果这个扰动未导致功率的任何净变化，那么发电机应该回到其原始状态。如果在负荷、发电机或网络条件中的一个变化导致了供需之间的一个不平衡，则要求一个新的运行状态。在任何情况下，如果系统是稳定的，则所有互连的同步发电机应该保持同步性，即它们应该都保持并行且在同一个速度下运行。

跟随一个系统扰动的暂态是随后的振荡。但是，如果这个系统是稳定的，则这些振荡将被阻尼至一个新的静止运行条件。然而，这些振荡体现为传输线上的潮流波动。如果连接两组发电机的某条线路遭受剧烈潮流波动，那么该线路将被它的保护设备断开，致使这两组发电机失去联络。这个问题称为联络线的稳定性，但事实上它反映的是这两组发电机的稳定性。

声称一个电力系统是“稳定的”，这一陈述是相当模糊不清的，除非清晰地明确所检验的稳定性存在的条件。这些条件包括运行条件及给予系统的扰动类型。因此，以上同样的事实可以称为关于联络线的稳定性。因为这里我们仅关注线路是否跳闸，所以所能容忍的潮流波动取决于这个系统最初的运行条件，包括载荷线路及遭受怎样的冲击。随着大规模互连系统的出现，这些问题变得至关重要。事实上，总有可能找到一个将导致系统不稳定的极其严重（但不大可能出现）的扰动。因此，对于系统应该设计得能维持稳定性的那些扰动，必须谨慎地选择。

1.3.1 稳定性的原始定义

前面已介绍了术语“稳定性”，现在，我们提出该术语的一个简单的非数学定义，以满足一些基本问题。随后，我们将给出更严密的数学定义。

所感兴趣的问题是：当运行在稳定负荷条件下的一个电力系统遭受扰动时，会导致同步发电机的电压相角重新调节。如果这类事件的发生导致系统发电机与负荷之间的不平衡，随着电压相角的调节，系统将进入一个新的稳态运行条件。扰动可能是一个大的故障，如一台发电机的退出，一条线路的故障或退出，或者这类事件的组合。在正常运行条件下，也可能出现一个小的负荷或随机负荷变化。

对新运行条件的调节过程称为暂态期。在这个时间的系统行为称为动态系统行为，这正是定义系统稳定性时所关注的。稳定性的主要标志是在暂态期结束时，同步发电机都能维持同步性。

定义：如果一个系统在扰动后的暂态期间的振荡响应受到阻尼，且系统在未来的时间进入一个新的稳态运行条件，那么我们说这个系统是稳定的。如果系统不是稳定的，则认为是不稳定的。

稳定性的这一原始定义要求系统振荡受到阻尼。这个条件有时称为渐近稳定性，其意味着系统包含固有的力以趋于减弱振荡。在许多系统中，这是所期望的特性，且是电力系统所必需的。

这一定义还排除了稳定系统族的连续振荡,虽然振荡器在数学意义上是稳定的。这个理由是实际的,因为对于电力的供需双方来说,一个连续振荡的系统将是不可接受的。因此,对于可接受的运行条件,这一定义描述了一个实际的特性。

1.3.2 其他稳定性问题

当同步发电机和联络线的稳定性是最重要和最普遍的问题时,其他的稳定性问题也存在,特别是在电力系统已达到相当可观的容量时。在这种情况下,必须做适当的安排,以避免照明负荷条件下的过电压、避免损害设备及保护发电机的自励磁。

有些问题在第三部分讨论,有些则超出了本书的范围。

1.3.3 同步发电机的稳定性

应该区分突然变化和重要变化之间的差异,我们将它们称为大冲击及更常见的随机小冲击。高压传输网络的故障或一台重要发电机的退出运行是大冲击的例子。如果这类大冲击之一发生,则同步发电机将可能丧失同步性。无须详细地讨论,一般的评述就足以说明问题。首先,这类冲击的发生有有限的或然性。因此,系统应该被设计为对能够承受的那些冲击必须优先选择。其次,遭受某个确定扰动后系统能继续运行的能力取决于在扰动发生时时刻系统的精确运行条件。对同样的扰动,在稳定性研究中,系统载荷的一个变化、发电计划表、网络互连或线路保护的类型,都可能给出完全不同的结果。可见,暂态稳定性研究是非常特殊的,从这类研究中,工程师可以推断,在给定的系统条件下,对于一个给定的冲击,同步发电机将能或者将不能保持同步性。稳定性主要取决于扰动的幅值和位置,而较少取决于系统的原始状态或运行条件。

现在,让我们考虑一种状态,即没有重要的冲击,但在系统载荷中存在一个随机的小变化。这里,我们假设系统运行人员已经安排好计划表,已使得有足够的发电机容量来支撑负荷。我们还假设每台同步发电机都运行在其功角曲线的稳定部分,即运行在功率随功角的增长而增长的部分。在从一个运行点到另一个运行点的过渡的动态过程中,为调节负荷的变化,发电机的稳定性将由许多因素决定,包括功角曲线。仅考虑功角曲线有时是不适当的,因为现代励磁器将改变这个过渡过程期间的运行曲线。研究同步发电机在小负荷变化条件下的稳定性问题称为稳态稳定性。最新且肯定更为恰当的名词称为动态稳定性。与暂态稳定性相比,动态稳定性与系统状态的特性关联更大。

暂态稳定性和动态稳定性是两个必须解决的问题,以确保工程师能有效地制定系统规划和确定系统运行。事实上,在过去,已经将这两个稳定性问题人为做了分类,我们至今仍要采用这种分类,因为这样有助于使这两个问题在数学处理上适应于所做的不同近似和假设。以下几点支持了这个观点。

首先,高速数字计算机的实用性和现代建模技术,使得描述电力系统的任何元件几乎在任意所要求和所期望的完善程度下都是可能的,从而存疑的简化和假设都不再需要,通常也不必论证其有效性。

其次,也许更重要地,在大型互连系统中,一个扰动的全部影响,要在它发生后的某个时间,也许是数秒,才会对遥远的部件产生作用。这样,对于局部性的扰动,互连系统的不同部件在响应时间上也不同。这些不同部件的响应是否有助于稳定性,事先对此进行预测将是困难的。如果初始扰动由于功率振荡而引起邻近区域中的其他扰动,则问题将更为复杂。当这些情况继续扩展下去,将可能出现连锁反应及大面积的停电事故。然而,在一个大型的互连系统中,必须研究一个冲击在一个相当长时间内的影响,通常是几秒,在某些情况下,是几分钟。这类长期动态稳定性行为的研究要求对在所谓暂态稳定性研究中通常忽略的系统设备进行仿真。

1.3.4 联络线的功率振荡

在系统正常运行期间，当出现一个随机的功率冲击时，这个附加的功率必然由发动机组提供。在不同条件下，由不同发电机组提供的这部分功率大小，取决于各发电机组与冲击位置的电气距离、各发电机转子所存储的能量、调速器特性及其他因素。因此，发电机永远不会真实地运行在稳态状况下，除非在停运的时候。每台发电机对其他发电机来说，都处在连续的振荡中，就是因为这些随机刺激的影响。这些振荡反映在传输线上的功率潮流中。如果监测任意一条线路的功率，就会观察到叠加在稳定潮流上的周期性振荡。通常，这些振荡不大，因此并不会引起人们的关注。

当一条联络线将一群发电机组与另一群发电机组连接起来时，在一定程度上，这条联络线上的状况会有不同。这两群发电机组彼此间连续振荡，这个振荡在这条联络线上的功率潮流得到体现。如果一群发电机组依次地连接至另一群发电机组，这种情况则可能变得更加复杂。这样，我们所讨论的联络线实际上可能连接着两个大型系统。在这种情况下，在这两个大型系统中，最小的振荡调节在这条联络线上就体现出相当可观的功率振荡。于是，问题变为：在何种程度上这些振荡是可接受的？

以上问题完全不同于维护在联络线上的有计划的功率交换，实现这个交换功能可通过控制设备来执行。这些控制器的反应通常过于缓慢，以至于难以对以上提到的动态振荡起到有效的抑制作用。为了抑制这些振荡，必须考虑整个互连系统元件的动态响应。问题不仅在于这条联络线本身，而且还在于它所连接的两个系统及两个系统内控制的灵敏性。电气强度（导纳）或联络线的容量也与这个问题密不可分。例如，在一条 400 MW 联络线上出现 40 MW 的振荡，这个问题要比在一条 100 MW 联络线上出现同样的振荡轻微得多。振荡频率对原动机、励磁机等阻尼特性有一定影响。因此，从稳定性的观点看，可以有效地确定联络线的最小容量。

1.4 冲击对系统元件的影响

本节概览冲击的影响，以评估在稳定性研究中应该考虑的因素。一个便捷的起点是，将一个冲击与网络中某处的功率变化联系起来。我们的“测试”激励是一个功率变化，将采用冲击点作为参考点。随后的影响在整体或局部上，都能感受到。这个系统的频率也将变化，因为在发电机调节器开始调节输入功率之前，变化的功率将由发电机转子的能量所吸收或引出。频率的变化将影响负荷，特别是电动机负荷。电力系统工程师常采用的粗略估计方法是频率的下降导致负荷按照同样的百分比下降，即负荷调节率是 100%。除非功率的变化伴随着无功功率变化，网络母线电压受到的影响要小得多。

1.4.1 失步

发电机与负荷之间的任意不平衡，都会引起同步发电机转子“摇摆”的暂态现象，因为净加速（或减速）转矩作用在这些转子上。如果这些净转矩足够大，引起一些转子摇摆得特别严重，致使一台或多台发电机“滑过一个磁极”，就会失去同步性。为了确保稳定性，在任何发电机经历上述状况之前，必须达到一个新的平衡状态。失步也可能出现在其他阶段，例如，在摇摆时，初始暂态引发传输网络上的电气连接断开，这就引起另一个暂态，当这个暂态叠加在第一个暂态上时，就可能造成失步。

现在，让我们考虑由一个较大程度的发电不平衡（例如过剩发电）引起的强烈冲击。这一过剩能量的大部分将转化为动能，从而，大多数发电机的转子角将增加，小部分将消耗在负荷及系统的各种损耗中。然而，发电机速度的适当增加并不必然意味着将失去同步。这里，重要的因素是各发电机之间的转子角差，而转子角是相对于一个同步旋转参考轴来度量的。图 1.1 说明了这个问题，图中显示了一个假设的四机系统中发电机转子角在暂态期相对时间的变化曲线。

在工况(a)中,所有转子角的增加都超过 π 弧度,但是,全部角差都很小,所以,如果它最终停止在一个新角度,系统将是稳定的。在工况(b)中,可以明显地看出,发电机分为两组,这些转子角持续地越拉越大,这个系统是不稳定的。

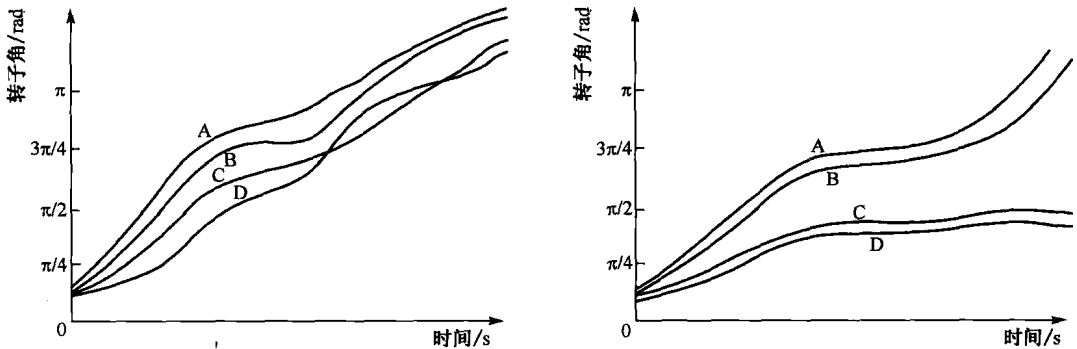


图 1.1 一个四机系统在暂态期的响应: (a)稳定系统; (b)不稳定系统

1.4.2 暂态过程中的同步发电机

在一个暂态过程中,从一台同步发电机角度看系统,系统引起发电机端电压、转子角和频率发生变化。从发电机端向网络方向“看”,所看到的阻抗也发生变化。励磁绕组电压也将受到以下因素的影响:

(1) 由于电枢电流的突然变化,在阻尼绕组(或转子铁心)中引起感应电流。这些感应电流的时间常数在量级上通常低于 0.1 s,一般称为次暂态效应。

(2) 由于电枢电流的突然变化,在励磁绕组中引起感应电流。这个暂态的时间常数以秒为量级,称为暂态效应。

(3) 如果发电机端电压变化而引起励磁机电电压变化,将会导致转子电压变化。次暂态和暂态这两种效应都可以观察到。因为次暂态效应迅速衰减而通常被忽略,故需要重视的仅仅是暂态效应。

注意,以上所讨论的行为还取决于网络阻抗及发电机参数。

发电机输出功率还将受到转子绕组电动势、转子位置及发电机端“看”到的阻抗任意变化的影响。然而,直到转速变化达到发电机调速器能感知和校正的阈值之前,输出功率的变化将来自存储在发电机转子上的能量。这里,重要的参数是动能,单位是 MW·s/MVA(通常称为 H),或者发电机组的机械时间常数 τ ,它是每 MVA 存储动能的两倍。

当冲击较大时,所有发电机的转速都变化,以至于这些转速的变化都能被发电机的调速器所感知。在负荷频率控制下的发电机将校正功率变化。在这一校正执行以前,每台发电机分担的功率将取决于它的调节特性或者说下降特性。因此,这些受控的发电机将承担维持系统频率的责任。然而,暂态过程期间的动态是重要的。关键的参数是调节器的动态特性。

另外,联络线的功率潮流也可能会轻微地改变。因此,要安排一些发电机以满足在这些联络线上维护计划潮流的需要。还要给这些发电机配置附加控制,其基本功能是让每个控制区域为给定负荷供电。这些控制的响应相当慢,其时间常数以秒为数量级。这样做是合理的,因为发电机的计划经济载荷相对于稳定性来说是次要的。

1.5 仿真方法

如果观察具有大量发电机、线路和负荷的大型电力系统,并且考虑任意冲击所带来后果的复杂性,我们很可能认为妄图对此做任何分析都是没有希望的。然而,幸运的是,这些现象的时间常数可能是明显不同的,这就允许我们将关注点集中在影响暂态过程和所研究的范围这些关键因素上。

在稳定性研究中，第一步是建立系统在暂态期间的数学模型，模型中要包括影响发电机转子加速（或减速）的那些元素。模型的复杂性取决于暂态过程和所研究系统的类型。通常，影响发电机电气和机械转矩的系统元件应该包含在模型中。这些元件包括：

- (1) 暂态前、暂态中和暂态后的网络。
- (2) 负荷及它们的特性。
- (3) 同步发电机的参数。
- (4) 同步发电机的励磁系统。
- (5) 机械涡轮机和调速器。
- (6) 发电厂中影响机械转矩的其他主要元件。
- (7) 其他附加控制，例如联络线控制，它在系统的数学描述中被认为是必要的。

从而，寻求答案的基本要素是对暂态开始前的电力系统初始条件、影响同步发电机暂态行为的系统主要元件的数学描述的了解。研究中包含的电力系统元件数量和它们的数学描述的复杂性取决于许多因素。一般而言，需要采用微分方程来描述不同的元件。系统的动态行为的研究取决于这些微分方程的特性。

1.5.1 线性系统方程

如果系统方程是线性的（或者是被线性化的），则可以采用线性系统分析的技术来研究动态行为。最常用的方法是由元件的传递函数来模拟每一个元件，将各个传递函数块联系起来以描述所研究的系统。从而系统行为可以由根轨迹法、频域分析法（奈奎斯特判据）和罗斯判据来分析。

以上方法已经常用于研究小系统或者发电机数量不多的系统。对于大系统，更常用的方法是将状态空间模型与由线性微分方程描述的系统关联起来。稳定特性可以通过检验 A 矩阵的特征值来确定，其中， A 由以下方程定义：

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.1)$$

式中， x 是表述系统状态的 n 维向量， A 是一个系数矩阵。系统输入由 r 维向量 u 描述，这些输入在数学上与微分方程通过一个 $n \times r$ 矩阵 B 联系起来。这类描述有一个优点，即 A 可以是时变的，如果有必要， u 可以表示几个输入。

1.5.2 具有非线性方程组的大系统

暂态稳定性研究的系统方程通常是非线性的。这里给出的是一大组相互耦合的非线性微分方程组所描述的系统形式：

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1.2)$$

式中， f 是一个 n 维非线性函数向量。

决定式(1.2)描述的系统动态行为，比决定式(1.1)描述的线性系统的动态行为要困难得多。通常，非线性微分方程组的时间解借助于数字计算机的数值方法得到，并且这也是电力系统稳定性常采用的方法。如 1.4.1 节所讨论的那样，同步发电机的稳定性通常由发电机的转子角决定。近来，非线性系统稳定性的现代理论已经应用于电力系统暂态的研究，以确定同步发电机的稳定性而不必求出时间解。这些努力，似乎展现了可观的前景，但仍然在研究的阶段，还没有得到普遍应用。线性方程组和非线性方程组将在以下的章节中展开讨论。

习题

- 1.1 给出以下术语的定义:
- 电力系统可靠性
 - 电力系统安全性
 - 电力系统稳定性
- 1.2 按照如下方式区分稳态(动态)稳定性和暂态稳定性:
- 扰动的类型
 - 定义方程组的性质
- 1.3 一条联络线是什么? 每条线路都是联络线吗?
- 1.4 就所关注的电力系统而言, 冲击是什么?
- 1.5 考虑图 P1.5 所呈现的系统, 一个物体 M 受到驱动力 $f(t)$ 的牵引, 且受到一个线性弹簧 K 和一个理想减振器 B 的约束。为这个系统, 写出关于位置变量 x 的微分方程, 且当 $f(t)$ 是一个单位阶跃函数时, 确定能提供临界阻尼的 B 和 K 的相对值。

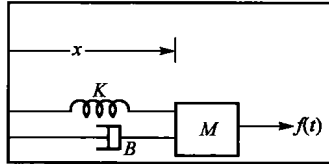


图 P1.5

- 1.6 重复习题 1.5, 将方程改写为类似于式(1.1)的状态空间形式。

第2章 基本数学模型

稳定的电力系统是这样的一个系统，当受到干扰时，如果无功功率的净变化，同步发电机则回到它们的原始状态，如果未失去同步，则渐近地进入一个新状态。通常，这类扰动引起一个振荡性质的暂态过程，如果这个系统是稳定的，振荡将会衰减。

这就出现了一个问题：什么量或信号能使我们检测其是否稳定呢？一个便捷的量是相对于同步旋转参考轴的发电机转子角。如果任意两台发电机之间的转子角差无限地增大，或者振荡暂态过程不能得到有效抑制，则系统是不稳定的。本章的主题主要是基于发电机转子角的行为来研究稳定性。

2.1 摇摆方程

摇摆方程描述发电机转子的运动，并将惯性转矩与在转子上的机械转矩和电气转矩的合成量相关联，即^①

$$J\ddot{\theta} = T_a \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2.1)$$

式中， J 是附加在转子轴上的所有转动质量的转动惯量，单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ； θ 是转子轴关于一个固定参考轴的机械角，单位是 rad ； T_a 是作用于转子轴上的加速转矩，单位是 $\text{N} \cdot \text{m}$ （对这个方程的单位和量纲的很好分析，见 Kimbark^[1]）。因为所论述的电机是一台发电机，所以驱动转矩 T_m 是机械转矩，制动或负荷转矩 T_e 是电气转矩。从而，可以写出

$$T_a = T_m - T_e \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2.2)$$

上式建立了一个有意义的符号惯例，即在上式中，正的 T_m 使转轴加速，而正的 T_e 是一个减速转矩。角度参考轴可以选择一个以恒定角速度 ω_R ^②运动的同步旋转参考轴，

$$\theta = (\omega_R t + \alpha) + \delta_m \quad \text{rad} \quad (2.3)$$

式中， α 是一个常数。如果 δ_m 与前述的角度参考轴不同的一个轴为参考对象，那么就需要角度 α ；例如，在第4章中，对转子角 δ_m 的参考轴的一个特定选择，就得到 $\alpha = \pi/2$ 和 $\theta = \omega_R t + \pi/2 + \delta_m$ 。从式(2.3)中，我们看到，式(2.1)中的 $\ddot{\theta}$ 可以由 $\ddot{\delta}_m$ 替换，得到

$$J\ddot{\delta}_m = J\dot{\omega}_m = T_a \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2.4)$$

式中， J 为转动惯量，单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ； δ_m 是相对于同步旋转参考轴的机械（下标 m ）转矩角，单位是 rad ； ω_m 为转轴的角速度，单位是 rad/s ； T_a 为加速转矩，单位是 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

有时，采用式(2.4)的另一种形式，即在其两边同时乘以以 rad/s 为单位的转轴角速度 ω_m 。回忆可知，转矩 T 乘以角速度 ω 就是以瓦为单位的转轴功率 P ，从而有

$$J\omega_m \dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2.5)$$

式中， $J\omega_m$ 称为惯性常数，用 M 表示（关于惯性常数的深入论述，见 Kimbark^[1]，pp.22-27 和 Stevenson^[2]，pp.336-340）。它与转子的动量 W_k 有关， $W_k = (1/2)J\omega_m^2$ 焦耳。于是， M 按下式计算：

① 点符号用于表示关于时间的导数，如 $\dot{x} = dx/dt$ ， $\ddot{x} = d^2x/dt^2$ 等。

② 对所有的量，包括速度，采用下标 R 表示“额定”，在 ANSI 的 ANSI Y10.5, 1968 标准中采用 ω_1 ，因此，在任何情况下，有 $\omega_R = \omega_1$ 。