

电力系统次同步振荡 及其抑制方法

肖湘宁 郭春林 高本锋 杨琳 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电力系统次同步振荡 及其抑制方法

肖湘宁 郭春林 高本锋 杨琳 著



机械工业出版社

本书以作者的研究成果为主体,介绍了电力系统次同步振荡现象的基本理论、分析方法和抑制措施,并且与相关工程应用相结合,给出了利用 FACTS、HVDC 等多种电力电子换流装置抑制和消除次同步振荡的原理和控制方法。

本书可以为从事次同步振荡问题研究的学者、技术人员和研究生提供帮助,并为工程设计与现场运行提供可借鉴的技术知识。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统次同步振荡及其抑制方法/肖湘宁等著. —北京:机械工业出版社, 2014. 1

ISBN 978 - 7 - 111 - 44605 - 7

I. ①电… II. ①肖… III. ①电力系统 - 次同步谐振 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 256524 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:闫洪庆 版式设计:霍永明

责任校对:陈立辉 封面设计:路恩中 责任印制:杨 曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17 印张 · 2 插页 · 421 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 44605 - 7

定价: 58.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心 : (010) 88361066 教材网 : <http://www.cmpedu.com>

销售一部 : (010) 68326294 机工官网 : <http://www.cmpbook.com>

销售二部 : (010) 88379649 机工官博 : <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

次同步振荡是电力系统稳定问题之一，而电力系统的稳定始终是一个具有挑战性的课题。早在1937年，同步发电机承载容性负荷或经串联电容线路接入系统激发次同步频率谐振问题的研究与讨论就已经开始，那时称之为自励磁现象。直到20世纪70年代，在美国发生了两起因为次同步能量交换致使发电机组轴系严重扭转振荡，造成机组脱网、大轴损坏的事故，次同步谐振问题才真正引起电气工程界和学术界的高度关注，并由此掀起次同步振荡的研究热潮。近年来，随着输电线路串联电容补偿器的投运数量增多，我国的次同步振荡问题也变得突出起来，特别是大功率高电压直流输电在集中式火电和规模化风电电力输送中的广泛应用，其具有的高速功率控制功能与快速调节特性在提高输电能力及其灵活性的同时，也引起了交直流系统中的扭振相互作用，同样导致系统在次同步频率下的电磁振荡，甚至危害到发电机组轴系的安全运行。新的次同步振荡现象发生的起因和表现形式、影响程度和阻尼能力以及监测和控制方法等诸多问题再一次引起世界范围的广泛重视。

我国经济建设快速发展带动了电网建设的巨大变化，在经历了30多年改革开放后的今天，已经跨越式发展为世界电力能源生产大国。需要指出的是，为适应我国能源赋存与消耗远距离逆向分布的格局，电力系统采用了大量基于电力电子技术新型灵活电力控制调节装置，这其中包括为提高电力输送能力和系统动态稳定的可控串联补偿设备，以及为实现大容量长距离输电的高压直流换流站等，其工程投运数量已经跃居世界第一。不难想见，与此密切相关的次同步振荡等系统稳定问题必将日益突出。事实上，在东北电网的伊敏发电厂和呼盟火电生产基地次同步振荡已造成发电设备损伤事故；陕蒙交界地坑口电站——锦界电厂在论证采用串联补偿大容量电力外送方案时，也发现存在着严重的次同步发散振荡的风险和危害。可喜的是，在我国电力科技工作者的积极探索和不懈努力下，紧密结合工程实际，经过大量仿真分析和物理实验，提出了采用导纳调制原理的国产化次同步谐振动态稳定装置（SSR-DS），并成功地应用于锦界电厂的发输电系统，有效地缓解了存在的次同步振荡问题，避免了可能造成的重大经济损失，保证了大型电厂电力的安全生产和稳定输送。

撰写一本论述电力系统次同步振荡的发生机理与抑制方法的著作是我们多年来在开展这方面研究工作中逐渐产生的一个想法。可是，如何将我们获得的研究成果和在这一领域中已有的宝贵应用经验系统地总结出来，撰写出一本有特色的著作却并不是一件容易的事情。好在程时杰院士等在国内出版了第一部关于电力系统次同步振荡的专著，系统地论述了次同步振荡的基本理论和方法，深度总结了他们在次同步振荡研究方面取得的成果，为后续开展电力系统次同步振荡问题研究和应用奠定了理论基础，也给了我们

极大的启发与思考。经过一段时间的反复讨论和酝酿,我们将这本书定位于:在详细阐述电力系统稳定性及次同步振荡的基本原理的基础上,以采用先进电力电子技术和控制方法实现次同步振荡抑制为主线,以分析工程实际应用的方法和效果为特点,系统阐述次同步振荡的发生机理和动态特性、交直流系统中的扭振相互作用及其抑制方法和控制策略,向读者介绍在这方面研究的新进展和新知识,为该领域的研究者和工程技术人员提供一部有实用参考价值的书籍。

本书共分10章,由4部分主要内容组成。第1部分为关于电力系统次同步振荡的基本理论,它包括第1~4章,总结性地介绍了电力系统稳定性的基本问题和分类、解决次同步振荡稳定问题的必要性以及用于次同步振荡分析的基本方法;简要阐述了在研究次同步振荡问题时必然要涉及的电力系统各主要元件及环节的数学模型,给出了来自于国际组织关于次同步振荡的相关名词和定义,并且以输电线路串联电容引起的典型次同步谐振为切入点,研究分析其机理和电气阻尼特性。第2部分为采用多种电力电子装置实现次同步振荡抑制的方法,它包括第5、6章,分别论述了多种串联型FACTS装置抑制次同步振荡的基本原理和控制特性以及作者多年来参与研究并应用于工程实际的并联型SVC装置抑制次同步振荡的工作原理、控制策略、实验结果和应用效果。第3部分为传统LCC-HVDC快速功率控制环节激发的次同步振荡问题和柔性VSC-HVDC的阻尼特性,它包括第7、8章,分别论述了次同步频率分量在交直流之间传递关系和激发过程、交直流系统中的扭振相互作用机理、阻尼特性和控制方法,并且详细分析和给出了关于SSDC的控制策略与参数设计方法。第4部分为以上3部分的补充内容,它包括第9、10章的介绍。在第9章中分类整理和简要描述了在次同步振荡方面提出的其他不同原理和特性的抑制方法;为了保证本书以电力电子新技术应用为特色的章节布局风格,特别将工程应用较多的次同步抑制方法——附加励磁阻尼控制器包含在其中。在第10章中介绍了辅助工程设计的数字-物理闭环仿真平台的实现以及作者研发的用于SSO特性分析的机电-电磁暂态混合实时仿真的方法。

以上四部分内容分别由郭春林、高本峰、肖湘宁、杨琳负责撰写。本书由肖湘宁制定编写大纲,并完成全书的修改统稿。

在本书的撰写过程中,先后有李伟、张剑、郑蕤、张丹、王晋、徐坤等研究生在完成其硕士和博士论文的同时,参加了部分内容的资料补充和起草工作。

此外文中还采用了姜旭博士和赵洋博士前期完成的博士论文所取得的成果,这里对他们勤奋好学,勇于探索 and 无私奉献的精神表示赞扬和感激。在文稿和图表整理与稿件编排等方面博士生张剑、罗超,硕士生许建庭付出了大量辛勤工作,提出了许多很有新意的想法,这里也一并表示感谢。同时,我们还要对书中引用的参考文献的作者们表示真挚的谢意。

还需要特别感谢的是,程时杰院士在百忙中对本书进行了认真仔细的审阅,提出了许多宝贵的意见。他为人师表、一丝不苟的学术作风使我们深受教育。正是他的关心、支持和鼓励,使得这本著作更加严谨和完善。陕西电力科学研究院武云生教授级高工在呼盟系统SSO问题上多次与我们开展了深入的讨论,并在本书撰稿过程中给出了中肯的

意见和建议。

本书撰写历经三年多时间，其间我们对起初拟定的撰写大纲不断讨论认识，补充修改，几易其稿，终于完成了既定的写作任务。在写作的过程中我们也深深体会到，电力系统稳定是电网永恒的核心问题，次同步振荡是随着系统发展不断出新、不断需要探索的重要问题。例如，在书中并没有详细谈到的关于新能源发电过程中的次同步控制相互作用（SSCI），就是当前新出现的热点研究课题之一。本书仅反映了已经取得的部分研究成果和我们的认识。

该著作的出版得到国家科技支撑计划课题——“基于 WAMS 的多 FACTS 协调控制技术研究”（2011BAA01B02）的资助和支持。

限于作者的学识水平，书中不妥与错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2013 年 3 月于北京朱辛庄

华北电力大学

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 电力系统的发展与面临的挑战	1
1.2 电力系统的稳定性	3
1.2.1 电力系统稳定性问题与分类	3
1.2.2 电力系统常见的稳定性问题	5
1.3 电力系统稳定性分析与控制方法	7
1.3.1 电力系统分析与控制的技术路线	7
1.3.2 电力系统分析的基本方法	8
1.4 次同步振荡现象与常见抑制方法	13
1.4.1 次同步振荡问题的由来	13
1.4.2 次同步振荡现象的基本类型	14
1.4.3 次同步振荡的常见抑制方法	14
1.4.4 次同步振荡问题的研究现状	18
1.5 研究次同步振荡的目的和意义	21
1.5.1 我国远距离、大容量输电的需求及 其次同步振荡风险	21
1.5.2 由输电线路串联补偿引发的次 同步振荡	21
1.5.3 由高压直流输电引发的次同步 振荡	23
1.6 本书的主要内容	24
参考文献	25
第2章 电力系统动态分析基本模型	29
2.1 引言	29
2.2 同步发电机的数学模型	29
2.2.1 理想电机假设条件	29
2.2.2 派克变换	30
2.2.3 同步发电机的标么值	31
2.2.4 同步发电机的电压方程和磁链 方程	32
2.2.5 同步发电机的等效电路、运算 电抗及实用参数	34
2.3 励磁系统的数学模型	37
2.4 原动机及调速系统的数学模型	40
2.4.1 汽轮机及其调速系统模型	40
2.4.2 水轮机及其调速系统模型	42
2.5 汽轮发电机组轴系的数学模型	43
2.5.1 轴系分段集中质量弹簧模型	43
2.5.2 轴系连续质量弹簧模型	45
2.6 交流输电网络的数学模型	46
2.6.1 含有串联电容器的输电线路 模型	47
2.6.2 变压器模型	48
2.6.3 并联电容器模型	49
2.6.4 并联电抗器模型	50
2.6.5 坐标变换及机网接口	50
2.7 小结	51
参考文献	51
第3章 电力系统次同步振荡的理论 基础	53
3.1 引言	53
3.2 机电振荡的基本模型和概念	53
3.3 次同步振荡的术语及定义	56
3.4 次同步振荡基本原理与分类	61
3.4.1 异步发电机效应	62
3.4.2 轴系扭转相互作用	63
3.4.3 轴系扭矩放大作用	66
3.4.4 电气装置引起的次同步振荡	67
3.5 次同步振荡的基本分析方法	67
3.5.1 机组作用系数分析法	67
3.5.2 阻抗扫描分析法	68
3.5.3 特征根分析法	72
3.5.4 复转矩系数分析法	76
3.5.5 时域仿真分析法	78
3.6 小结	81
参考文献	81
第4章 固定串联补偿引发次同步谐振 的机理	83
4.1 引言	83
4.2 串联电容补偿系统	83
4.2.1 串联电容器组设备	83

4.2.2 串联电容器组接入位置	85	第6章 并联型 FACTS 装置抑制次同步振荡	135
4.3 输电线路串联电容器的补偿作用	86	6.1 引言	135
4.3.1 用串联补偿控制自然功率	86	6.2 SVC 抑制次同步振荡的分析	135
4.3.2 串联补偿度的极限	87	6.2.1 基本工作原理	136
4.4 次同步谐振的机理	88	6.2.2 用于 SSO 抑制的电纳调制原理	136
4.4.1 输电系统的电气谐振	88	6.2.3 抑制 SSO 的阻尼控制策略	141
4.4.2 轴系扭振的稳定性	89	6.3 SVC 抑制大型发电厂次同步谐振的工程应用	145
4.4.3 机电扭振相互作用	90	6.3.1 锦界电厂的次同步谐振问题	145
4.5 次同步电气阻尼特性	92	6.3.2 SVC 的系统结构设计	147
4.5.1 串联补偿度的影响	92	6.3.3 仿真效果分析	149
4.5.2 系统网架结构的影响	93	6.3.4 对系统影响的仿真分析	151
4.5.3 发电机出力的影响	94	6.3.5 SVC 现场调试及系统短路试验	154
4.5.4 发电机励磁系统及稳定器对阻尼特性的影响	94	6.4 STATCOM 抑制次同步振荡的分析	155
4.6 小结	98	6.4.1 基本工作原理	156
参考文献	98	6.4.2 次同步电流阻尼控制方法	157
第5章 串联型 FACTS 装置抑制次同步振荡	100	6.4.3 抑制 SSO 的控制策略	162
5.1 引言	100	6.4.4 仿真分析	167
5.2 NGH 抑制次同步振荡	100	6.5 STATCOM 抑制大型发电厂次同步振荡的仿真	169
5.2.1 基本工作原理	101	6.5.1 频繁超标的低幅次同步振荡	169
5.2.2 参数设计	101	6.5.2 级联型 STATCOM 抑制效果仿真	170
5.3 TCSC 抑制次同步振荡	103	6.6 小结	174
5.3.1 拓扑结构	104	参考文献	174
5.3.2 基本工作原理	105	第7章 HVDC 引发次同步振荡的机理及其控制	176
5.3.3 自然抑制 SSO 的机理	107	7.1 引言	176
5.3.4 主动抑制 SSO 的机理	113	7.2 次同步电气量在交直流侧间的传递关系	176
5.3.5 含 TCSC 的交直流并列系统电气阻尼特性	114	7.2.1 换相过程的开关函数描述	176
5.4 GCSC 抑制次同步振荡	119	7.2.2 次同步电气量从交流侧到直流侧的传递	177
5.4.1 基本工作原理	119	7.2.3 直流侧扰动向交流侧的传递	179
5.4.2 阻尼机理	121	7.2.4 测试系统仿真验证	179
5.4.3 仿真分析	122	7.3 交直流系统中的扭振相互作用	181
5.5 SSSC 抑制次同步振荡	123	7.4 电气阻尼特性	183
5.5.1 基本工作原理	123	7.5 SSDC 的工作原理	184
5.5.2 对功角特性的影响	124	7.6 SSDC 的设计方案及实现	186
5.5.3 控制策略	124	7.6.1 输入信号的选择	186
5.5.4 次同步频率阻抗特性	126	7.6.2 控制系统结构设计	187
5.5.5 主动阻尼的机理	128		
5.5.6 仿真分析	129		
5.6 小结	131		
参考文献	132		

7.6.3 控制参数整定	189	9.3.2 超导磁储能装置	229
7.6.4 SSDC 设计软件开发	196	9.3.3 装设极面阻尼绕组	230
7.7 SSDC 抑制次同步振荡的仿真验证	200	9.4 阻断次同步电气量	230
7.7.1 自然扭振频率不准确时	200	9.4.1 阻塞滤波器	230
7.7.2 线路 N-1 运行	204	9.4.2 旁路阻尼滤波器	234
7.7.3 机组出力不同	205	9.4.3 线路滤波器	234
7.7.4 单台发电机组故障时	207	9.4.4 动态滤波器	234
7.8 SSDC 对交直流系统的影响	208	9.5 减少机械侧与电气侧的能量交互	235
7.8.1 SSDC 对直流动态响应特性的 影响	208	9.5.1 抑制机理	235
7.8.2 SSDC 对交直流侧特征谐波的 影响	211	9.5.2 S-HSC 的结构及工作原理	235
7.9 小结	213	9.5.3 仿真分析	236
参考文献	213	9.6 轴系扭振继电保护措施	239
第 8 章 VSC-HVDC 的阻尼特性 分析	215	9.6.1 扭振继电器	239
8.1 引言	215	9.6.2 电枢电流继电器	239
8.2 VSC-HVDC 的基本原理	215	9.6.3 电容器双间隙闪络	240
8.3 VSC-HVDC 的阻尼特性分析	216	9.7 小结	240
8.3.1 VSC-HVDC 阻尼次同步振荡的 机理	216	参考文献	240
8.3.2 基于测试信号法的 VSC-HVDC 阻尼特性分析	217	第 10 章 次同步振荡实时仿真技术	242
8.4 VSC-HVDC 用于抑制串联补偿引发的 次同步振荡仿真	220	10.1 引言	242
8.4.1 待研系统模型	220	10.2 数字-物理闭环实时仿真的实现	243
8.4.2 混合阻尼控制器的设计	221	10.2.1 闭环实时仿真平台的搭建	243
8.4.3 仿真分析	222	10.2.2 物理控制器的闭环仿真验证	245
8.5 小结	223	10.3 电磁-机电暂态混合实时仿真的 实现	247
参考文献	223	10.3.1 电磁-机电暂态混合实时仿真的 基本原理	249
第 9 章 其他抑制次同步振荡的方法	224	10.3.2 次同步振荡混合实时仿真的 建模	252
9.1 引言	224	10.3.3 次同步振荡混合实时仿真与 现场录波对比	253
9.2 避开谐振点	225	10.4 用于仿真及现场试验的次同步振荡 激励方法	254
9.2.1 改变系统运行方式	225	10.5 小结	255
9.2.2 改变发电机组轴系参数	225	参考文献	256
9.2.3 增大机网间的串联电抗	225	附录	258
9.3 提高电气阻尼	225	附录 A 用于次同步振荡研究的 IEEE 标准 模型	258
9.3.1 附加励磁阻尼控制器	225	附录 B 中英文缩略语对照表	263

第 1 章 绪 论

1.1 电力系统的发展与面临的挑战

电能的利用是人类进步与发展的重要标志。如今,电能已成为现代科技与经济建设、社会文明和人们的日常生活不可或缺的主要能源形式。追溯电力工业的发展历程可以了解到,电力生产、传输和分配使用形成系统概念已有 100 多年。1882 年,爱迪生电力照明公司在美国纽约主持建造了世界第一个完整的直流电力系统,包括 6 台 12kW 直流发电机,用 110V 电压将电力线连接成网络为 6000 盏电灯供电。同一时期在我国,外商集资创办成立了商业化运营的上海电光公司,为城市照明提供直流电力。电能开始进入人类生产和生活领域。1889 年,第一条单相交流输电线路在美国俄勒冈州的维拉姆特瀑布和波特兰之间建成并投运,输电电压为 4kV,距离为 21km。1891 年,第一条三相交流输电线路在德国投入运行,从拉芬镇到法兰克福全程 178km,电压为 15.2kV,输送功率为 200kW,从此以后,三相交流输电很快取代了直流输电,成为电力系统大发展的里程碑。

100 多年来,随着世界工农业生产和社会经济的快速发展,对能源的需求,尤其是对电力能源的需求急剧增加,这极大地推动了电力系统规模的持续扩张和电力科技水平的不断提高。时至今日,现代电力系统在保持传统电力系统以生产、输送和分配使用三相正弦形式交流电力为主的基本特征之外,其突出的变化是以大机组、大电网、高电压和高度自动化为特点,在一些国家或地域已经形成一个大容量、长距离、跨区/跨国电网互联、交直流混合输电的巨大人造动力学系统。

电能具有清洁实用以及便于传输、转换和控制的特点,并且由于电力生产是一次能源实现清洁转化利用的重要途径,能源消耗形式越来越多地向电力能源转移,统计数据表明,电能占能源消耗中的比重在不断提高,我国发电能源占一次能源消费比重将从目前的 40% 提高到约 50%。从世界范围的能源危机来讲,化石能源的日益枯竭使人类面临着新能源的开发利用和节能增效的社会约束,到 2020 年,全世界非化石能源利用总量占一次能源消费比重将达到 15%,其中转化为电力的非化石能源占 84%。电力在能源转换利用体系中发挥愈来愈重要的作用。另一方面,提高电能占终端用户消费中的比重同样是降低总能源消耗的一个重要途径。数据分析表明,“十二五”期间,电力消耗占一次能源消耗的比重上升 1%,单位 GDP 能耗将下降 3% 左右。可以看出,利用电力驱动(如电力机车、电驱动船舶、电动汽车等)取代其他形式的动力驱动已经形成趋势,越来越多的领域更加广泛地实现着电气自动化。电气化水平的提升可以明显地提高能源综合利用效率,有利于能源消费总量控制目标的实现。有数据显示,到 2020 年,我国电能占终端消费能源比重有望从目前的 21% 提高到 27% 左右,2030 年进一步提高到 30% 左右,将成为我国第一大终端消费能源^[1]。

随着我国国民经济持续稳步发展和对能源的巨大需求,我国电力工业建设在近几十年里

增长速度名列世界前茅,取得了前所未有的辉煌成就。在传统发电和新能源发电能力方面,国家能源局发布的最新数据显示,到2012年底,全国电力装机容量达到11.4亿kW,这标志着我国已经成为世界第一电力能源生产大国。其中,水电装机容量达到2.49亿kW,居世界第一。风电装机容量迅速增加到6300万kW,成为世界第一风电大国,年发电量超过1000亿kWh。光伏发电装机容量由基本空白增加到700万kW。核电在建机组30台,共3273万kW,在建规模居世界第一。到2020年仅就风电而言,“三北”(华北、西北、东北)地区6个大型风电基地开发规模有望达到1.5亿kW。

在电力输送和电网建设方面,系统运行电压等级不断提高,网络规模也不断扩大,全国已经形成了东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网6个跨省的大型区域电网和电网间的互联。例如,我国第一个背靠背直流输电工程灵宝直流背靠背换流站,额定直流功率为360MW,可双向输送,将西北330kV电网和华中220kV电网非同步互联。我国东北—华北(高岭)500kV直流背靠背工程扩建输送能力达到3000MW,成为目前世界上单个换流容量最大的直流背靠背工程;另外,针对能源储备与转换和能源消费地域的严重不平衡,我国还将逐渐形成完整的、长距离输电的、跨大区源网协同的网架结构。在这方面已经投入商业运行的 ± 800 kV直流输电线路三回:①云南—广州特高压直流输电工程,额定输送容量为5000MW,直流线路全长1438km,是我国建成的第一条特高压直流输电工程;②向家坝—上海特高压直流输电示范工程,额定输送容量为6400MW,直流线路全长1907km;③新建的西电东送锦屏—苏州南特高压直流输电工程,额定输送容量为7200MW,直流线路全长2059km,是目前世界上输送容量最大、送电距离最远、电压等级最高的直流输电工程之一,代表了当前世界直流输电技术的最高水平。计划2015年至2020年,国家电网公司将逐步形成“两纵两横”、“五纵五横”的1000kV特高压交流同步网架结构,以及20多条 ± 800 kV及以上的特高压直流输电骨干通道,连接“三北”的各大型煤电基地、水电基地、核电基地、可再生能源基地和以“三华”(华东、华中、华北)电网为主要受端的负荷中心,逐步建成交直流混合输电、各级电网协调发展、清洁安全、稳定可靠的网络平台。

需要强调,以电力电子器件的研发、功率换流器及连接设备等制造水平和应用技术的进步为基础,极大地提高了输配电系统的灵活性。其中,基于全控电力电子器件的柔性输电技术取得了长足的进步和发展。利用柔性输电技术可以在进行精确有功功率控制的同时对无功功率进行双向控制。而且柔性直流换流站可工作在无源换流的方式下,不需要外加的换相电压,可用于弱系统或无源系统供电;柔性直流输电技术基本不需要滤波和无功补偿装置,其换流站占地面积较同等容量的常规直流换流站要小,为交流系统提供快速动态的电压支撑,控制更加灵活,可大大提高供电可靠性。2011年我国首个柔性直流输电工程——上海南汇风电场柔性直流输电示范工程投运,输送容量为18MW,电压等级为 ± 30 kV;世界上第一个五端柔性直流输电工程——舟山多端柔性直流输电重大科技示范工程即将实施,将在舟山北部主要岛屿间建设五座百兆瓦级换流站,加强诸岛之间的直流电气联系,提高供电可靠性,为就地分布式风能、太阳能等清洁能源利用奠定基础;世界上容量最大的柔性直流输电工程方案正在我国逐步落实,直流输送容量为1000MVA,直流电压为 ± 320 kV,用于解决跨城区电网增容及电力供应问题。

综上所述,电力系统的发展内涵在不断丰富,它不仅包括满足生产和输送电力的主网络基本概念,还包括将电力流、信息流、管理流三者密切结合的现代互联大系统。其中突出表

现为,充分利用先进的电力电子技术和广域信息技术,使原来基本不可控的电力系统转变为更加快速、准确和灵活控制的电力系统。近年来,在电力系统中“柔性交流输电系统(FACTS)”得到了迅速发展和大量应用,基于电力变换的静止无功补偿器(SVC)、晶闸管控制串联电容器(TCSC)、静止同步补偿器(STATCOM)等多种串并联形式的FACTS装置有效地提高了电力系统灵活控制能力。并且在将广域相位测量技术(PMU/WAMS)与FACTS装置相结合后,电力系统稳定控制进入了大电网协调最优控制的新时代。

我们应当认识到,电力电子技术在增强了电力系统可控性、灵活性的同时,也带来了新的电力扰动问题,例如,高压直流输电(HVDC)以及各种功率控制器的快速电力调节,造成系统阻尼能力发生变化或被削弱,由此引起机电耦合相互作用和产生系统次同步振荡(SSO)问题,从而可能导致大型汽轮发电机组的轴系扭振;另外,实现快速功率调节控制的电力电子装置之间的相互操控作用也愈加复杂起来,其影响将波及发电系统的安全稳定运行,近年来在国外文献中已经有关于双馈感应风机换流器控制与串联补偿线路之间次同步振荡问题的研究报道。

众所周知,电力系统正常运行以安全稳定为前提条件,以连续优质供应电力为其基本保证。随着科技的进步和事物不断地发展变化,虽然电力工业生产过程以及电力系统运行会提出许多新问题,但是就其物理本质和运动规律来看,动态系统的安全稳定依然是永恒的主题。当电网结构更加复杂,源网之间的耦合作用与影响更加紧密时,大电网和大型发电机组的安全稳定可靠运行问题会变得更加突出,系统失稳造成的损失将会是巨大的。如何应对系统在错综复杂的扰动下保证稳定运行仍然是重大的研究课题。变化中的电力系统将呈现出许多新现象、新问题,与此同时新概念、新思想、新方法也会不断涌现,电力系统稳定分析与控制研究领域将面临新的挑战。

进入21世纪以来,国际经济形势、能源形势发生了深刻变化,新一轮世界能源变革拉开了序幕,从发展清洁能源、保护生态环境、应对气候变化、保障能源安全、促进经济增长等需要出发,世界各国纷纷提出发展智能电网,智能电网已经成为全球电力行业研究和探讨的热点,成为了新世纪电力系统与电力产业发展的时代标签。

智能电网更加关注信息化、互动性和自愈性以及电力输送技术与通信、控制等技术的融合和基础设施建设,尽管如此,电力的高效转换、灵活传输、可靠供给仍然是电力系统的基础核心任务,电力系统的安全稳定和可靠运行的基本要求不会改变。随着智能电网建设的深入发展,无论是规模化或分布式新能源的传输与消纳,还是在应对电力扰动的耐受性和免疫力的提高上,对电力系统稳定性、安全性会提出更新的标准和要求。只有不断深入研究新条件下电力系统的现象机理和动态特性,不断丰富和完善电力系统稳定分析与控制的理论与方法,才能切实保障和促进智能电网的发展。可以说,高水平的电力系统安全稳定运行与控制是智能电网顺利发展的重要基石。

1.2 电力系统的稳定性

1.2.1 电力系统稳定性问题与分类

现代电力系统是一个巨大而复杂的动态系统,安全稳定性是其运行的基本要求。模型的

高维性、运行方式的不确定性、元件的强非线性、扰动的随机性，使得电力系统稳定现象和机理十分复杂。随着电网大规模互联，HVDC、FACTS 等柔性输电技术广泛应用，以及新能源电源比例不断提高，对电力系统动态机理与稳定性的分析与控制越来越困难^[2,3-5]。

电力系统稳定性是指，在给定初始运行条件下，电力系统受到物理扰动或者故障后，重新获得平衡运行状态，各种状态变量满足约束条件，从而保持全系统完整性的能力。

由于电力系统稳定性涉及多种多样的动态现象，从不同方面出发就有不同的分类方法，常见的有：根据稳定过程的特点，分为静态稳定性、暂态稳定性和动态稳定性；根据扰动的大小，分为小扰动稳定性和大扰动稳定性；根据稳定过程的时间，分为短时间稳定性、中长期稳定性和长期稳定性；根据稳定现象的不同，分为低频振荡、负荷稳定、次同步振荡和电气谐振等，其中次同步振荡又分为异步发电机效应、轴系扭转振荡和暂态扭矩放大作用等；根据稳定机理的不同，分为功角稳定（发电机稳定）、电压稳定、频率稳定、扭振稳定和滑差稳定等。

电力系统稳定性的定义与分类具有重要意义，清楚地、系统地理解不同类型稳定问题及其相互关系对于电力系统的良好设计和运行是非常必要的。因此，电力系统两大国际组织——国际大电网会议（CIGRE）和美国电气电子工程师学会（IEEE）多次给出过电力系统稳定性的定义与分类，并且根据电力系统大规模互联、新技术不断应用带来的稳定问题的新变化，设立联合工作组，于 2004 年给出了新的电力系统稳定性的定义与分类，其给出的稳定问题的分类如图 1-1 所示^[6]。

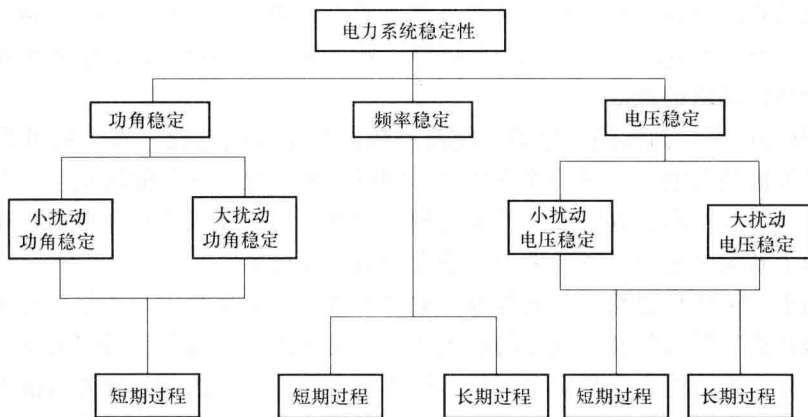


图 1-1 IEEE/CIGRE 给出的电力系统稳定问题分类

与此同时，根据我国电力系统长期设计、运行实践和研究经验，国内在电力系统安全稳定方面的标准中也提出了对电力系统稳定性的定义与分类，其中建议的电力系统安全稳定计算技术规范对稳定问题的分类如图 1-2 所示。

这两种定义和分类在总体框架和主要概念上是基本一致的。两者的主要区别包括：在功角稳定方面，后者除了包含 IEEE/CIGRE 所给出的非周期性失稳、周期性失稳和暂态失稳三种短期稳定过程之外，还给出了大扰动动态稳定的定义，是指在大扰动下，在包括慢速的自动调节和控制装置的作用下，保持较长过程功角稳定性的能力。在电压稳定方面，IEEE/CIGRE 定义认为小扰动电压稳定也包括短期和长期过程，但是国内定义认为小扰动电压稳定主要指静态电压稳定，不包括连锁反应等长期过程。

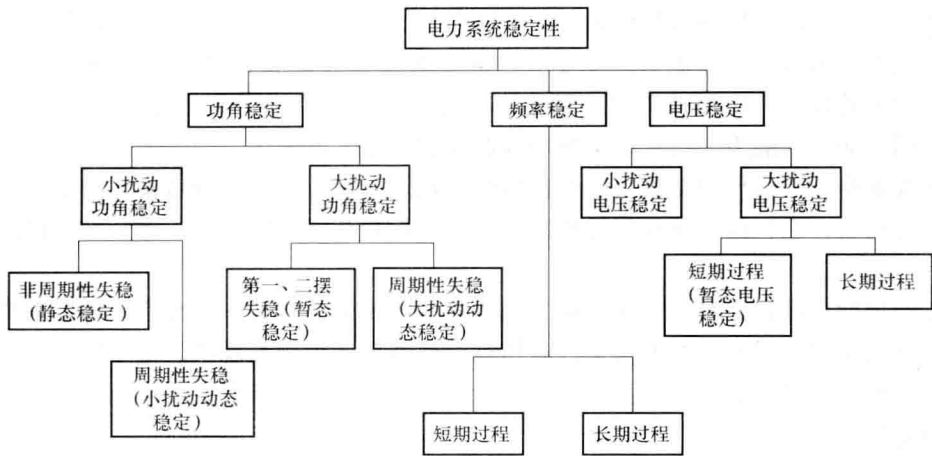


图 1-2 电力系统安全稳定计算技术规范给出的电力系统稳定问题分类

1.2.2 电力系统常见的稳定性问题

上面介绍了电力系统稳定性问题的多种分类方法，其中根据稳定机理进行的分类直接指出了稳定性问题的物理本质，与数学模型和分析方法密切联系，是一种广泛使用的分类方法。表 1-1 给出了常见稳定现象与稳定机理之间的相关性，其中第一列是几种常见的稳定现象，第一行则是内在机理的分类，而▲的多少表示该种稳定机理在对应现象中起主导作用的可能性。需要说明的是，这里给出的是通常情况下的结果，而在特定条件中，这种相关性强弱程度有可能会与该表格不同。例如，负荷稳定现象通常与电压稳定、转差稳定关系较大，但是在特定的系统结构和运行条件下，频率稳定也可能成为更重要的因素。

表 1-1 常见稳定现象与稳定机理的相关性

稳定现象 \ 稳定机理		功角稳定	电压稳定	频率稳定	扭振稳定	转差稳定
机电振荡 (低频振荡)		▲▲▲	▲▲	▲		
负荷稳定		▲▲	▲▲▲	▲▲		▲▲▲
次同步振荡	异步发电机效应		▲▲▲			
	轴系扭转振荡		▲		▲▲▲	
	暂态扭矩放大作用		▲▲		▲▲▲	

下面根据图 1-2 所示的基本分类体系对主要稳定性问题进行介绍，对其中涉及的机理和现象进行了介绍，同时补充了扭振稳定、转差稳定等概念，以形成更全面电力系统稳定问题的认识。

功角稳定性指互联系统中的同步发电机（包括等效固定频率电源）之间功角差不发散、保持同步运行的能力，主要与发电机及输电系统有关，也常常被称为发电机稳定性。功角稳定性常分为静态功角稳定性、小扰动动态功角稳定性、暂态功角稳定性和大扰动动态功角稳定性，功角失稳包括振荡失稳和爬行失稳两种情况，分别对应阻尼能力不足和同步能力不足两种原因。小扰动动态功角稳定性是指电力系统受到小扰动后保持同步运行的能力，它由系

统初始运行状态决定。静态功角稳定性可以视为小扰动动态功角稳定性的简化形式,一般只考虑同步能力而不涉及阻尼能力,主要关注静稳极限和静稳储备问题,表现为系统“准稳态”变化时的稳定性,因而被称为“静态”稳定性。暂态功角稳定性是指系统发生大扰动后,保持同步运行的能力,与扰动类型和控制保护措施关系密切,一般要求系统在三相短路和单相永久短路及相应保护动作后能够保持暂态稳定。大扰动动态功角稳定性是指电力系统受到大的扰动后,在包括调速器等慢速装置的全部控制装置的作用下,保持长时间同步运行的能力。

电压稳定性指扰动后系统电压能恢复到原先的电压值或是另一个允许的稳定平衡点的能力。由于电压是电力系统的基本参量,电压稳定性涉及各种动态现象。电压稳定性包括同步电压稳定性和异步电压稳定性两类,但是后者的影响较小,通常所说的电压稳定性就是指同步电压稳定性。

同步电压(工频电压)由电源激励产生,与潮流分布直接相关,局部电压失稳或崩溃后,将阻碍电能的有效传输,严重时可能导致全系统崩溃,造成巨大的经济与社会损失,因此受到了高度重视。同步电压的频率固定为工频,其稳定性表现为幅值的单调失稳,包括静态电压稳定性、暂态电压稳定性和中长期电压稳定性三种情况。与功角稳定性不同的是,电压稳定性对应特征方程中的实根,不存在振荡现象以及由此而来的同步和阻尼概念,因此静态电压稳定性就能够概括其小扰动下的稳定性。而在大扰动下,一些缓慢动作的控制器也会参与电压的调节过程,因此根据是否考虑慢速控制器的调节作用,将大扰动电压稳定性分为暂态电压稳定性和中长期电压稳定性。同步电压稳定性主要与无功功率的平衡有关,尤其在缺少无功支撑的大负荷中心容易出现这方面的问题。

异步电压稳定性问题包括异步发电机效应,轴系扭转振荡和暂态扭矩放大作用也可能伴随产生异步过电压现象。但是,由于电力系统正常运行时没有异步电源,产生异步电压稳定问题的范围和影响都是有限的。

频率稳定性指系统在发电机跳闸、系统解列、失去大负荷等大扰动导致有功功率不平衡下,通过调节系统的热备用出力和自动切除部分负荷,维持全系统或者解列后各子系统的频率不超出允许范围的能力。实现区域互联提高了电力系统调节有功功率平衡的能力,但是也容易产生区域间、区域内多种模态相结合的振荡,由此会导致关键线路被断开、关键机组被切除,从而威胁系统频率的稳定性。

扭振稳定性是随着大容量发电机组和远距离、大负荷输电技术应用而产生的问题,是指发电机-汽轮机轴系各质量块之间相对扭转振荡的稳定性,要求不发生持续、增幅扭转或者大幅度暂态扭转。在通常条件下,因为转子轴系刚度都很大,所以扭振稳定性只会发生振荡失稳而不会发生爬行失稳,关心的主要是扭转振荡的幅值和收敛性。扭振稳定性主要通过直接破坏轴系或者造成轴系疲劳寿命损耗累积而威胁发电机组的安全,对电网的影响范围和程度都较小。

转差稳定性又称电动机稳定性,是指电动机负荷在扰动下保持正常运行,不出现大规模堵转或者被切除的问题。因为出现转差稳定性问题时,可以通过大量切除负荷保持系统稳定,所以传统上转差稳定性并不被电力系统视为重要的稳定性问题,而只是作为影响电压稳定性的因素之一。但是,转差稳定性具有独立于电压稳定性的机理和过程。实际运行经验和研究结果都说明,电动机动态特性及其控制保护功能对系统稳定性具有重要影响,以其为关

键的负荷模型是提高电力系统分析准确性的最大的制约因素与难点^[7]。而且随着负荷敏感性的增加,切除负荷造成的损失也越来越大,必须尽量予以避免。因此,对转差稳定性机理与影响也需要开展更多的研究。

在现代大规模电力系统中,引起重大损失的往往是多种稳定性问题结合产生的连锁故障,在故障初期,一般功角稳定、电压稳定、扭振稳定问题更容易发生,随着部分元件被切除和时间的延续,频率稳定、转差稳定等问题也开始加剧,这时候如果系统中出现某些不恰当的控制和保护动作时,就有可能进一步扩大事故甚至导致系统崩溃。

1.3 电力系统稳定性分析与控制方法

1.3.1 电力系统分析与控制的技术路线

电力系统分析与控制的技术路线的差异体现在机理分析和数学模型分析相互关系的不同上,主要存在下述两种典型的技术路线:

1) 依赖于数学模型分析的技术路线。在这种技术路线下,对数学模型的分析主导甚至代替了对系统的研究,依赖于数学推导结果来阐明系统的动态特性,而机理分析只是对数学分析及其结果的解释,往往认为无足轻重。

2) 以机理分析为核心,结合数学模型分析的技术路线。与此同时,也存在以机理分析为核心,结合数学模型分析的技术路线,其中对系统动态机理的分析与把握是研究的核心内容,而数学模型分析只是作为一种工具和手段,为机理分析的开展提供支持,研究结果的正确性首先是依靠机理分析而不是数学公式来保证的。

从经典控制理论的传递函数分析发展到现代控制理论的状态空间分析,控制理论与方法在各领域取得了巨大的成功,基于数学模型分析的方法几乎成为了动态系统分析的代名词。大到卫星、飞船的发射,小到车床、玩具的控制,不论其实际动态过程及物理意义如何,都可以描述为一组状态方程,利用经典的稳定理论、控制理论分析其动态特性,其研究主要体现为数学关系的抽象、数学模型的建立和数学模型的分析,总体上依赖于数学模型分析,而机理分析似乎并不重要。

其中的原因是,对于简单系统和简单现象,状态方程/传递函数充分、完整地描述了状态变量之间的动态关系,而且其数学特征与物理特征之间有着清晰的对应关系,因此对数学模型分析的同时也揭示了其中的动态机理,从而包含或者代替了机理分析。并且,数学方法具有固有的严谨性、精确性,这是直接机理分析方法所不具备的。也就是说,数学模型分析从更本质、更深入的层面,采用更严谨、更精确的方式阐明了系统的动态机理,能够包含或者代替机理分析,因而掩盖了后者的作用与必要性。

电力系统领域也存在着类似情况,在单机无穷大系统、等效两机系统为主要对象的研究中,采用基于数学模型分析的研究方法,运用经典稳定理论、控制理论,对电力系统动态机理进行了深入研究,取得了丰硕成果,因此这也成为了占主导地位的研究方法。受此鼓舞,这样的研究方法也被用于多机系统中,人们希望通过同样细致严谨的数学推导,得到同样无懈可击的结论。

但是事实证明,多机系统动态问题是不可能完全依靠数学模型分析来解决的,也不存在

“完美”的数学答案。电力系统存在的高维性、强非线性、不确定性、控制信息本地化等问题，都是数学方法难以分析和解决的。因而，完全基于数学模型对电力系统动态特性的分析与控制，是很困难甚至是不可行的^[3-5]。

1937年，贝塔朗菲提出了系统论，指出任何系统都是一个有机整体，它不是各个部分的机械组合或简单相加，系统的整体功能是各要素在孤立状态下所没有的性质。既然系统特性与各要素特性之间并不存在简单的组合关系，那么对系统数学模型进行全面、精确的推理分析也不是必需的，通过机理分析抓住问题的主要方面和关键因素，就能够准确地分析系统的基本特性。

由此可见，对于大电力系统这样的复杂系统，完全的数学模型分析，不仅在实践上是困难甚至不可行的，而且在理论上也是不必要的。而以机理分析为中心，结合数学模型分析方法往往具有更好的针对性、有效性，也可以有效地研究电力系统有关问题的机理、特点和解决办法，如同步阻抗分析法^[8]、复转矩系数分析法、阻抗扫描法，通过基本自动控制原理、频率响应特性等方法来研究系统动态特性，能够为控制器设计提供指导^[3,5,9-12]；基于在线辨识的方法通过利用实时信息避开了系统建模和分析问题^[13-17]；而智能控制方法，则利用人工智能策略克服系统非线性、不确定性的影响，可以大大提高控制的适用性^[2,18-19]。

综上所述，电力系统是一个有着上百年历史的学科，通过以数学模型分析为主的研究方法使我们已经较好地掌握了电力系统主要的动态现象及其基本机理。然而，面对实际的巨大多机系统，还有很多综合性更强、更为复杂的问题需要解决。这些问题不能够再仅仅依靠数学推导来分析研究，而需要牢牢把握其内在机理，通过研究确定系统存在什么问题，有什么特点和规律，内在机理是什么，解决的难点是什么，问题提供了什么样的可能条件，怎么控制是好的，选什么方法才能做到这种好的控制，从而有针对性地予以解决。

另一方面，电力系统大型仿真计算技术、时频域分析、智能控制等方面的方法也有了长足的发展，通过时域仿真、时频域联合计算与分析等方式，我们可以很方便地直接观察和分析多机系统的动态特性与机理，不再只是仅仅依靠数学推导来进行分析；通过在线信息利用和智能控制策略的结合，可以回避在系统建模和分析上的困难，较好地解决问题。可以预见，将来还会出现更为丰富多样的方式方法，能够更好地将机理分析与数学方法结合起来，帮助我们解决复杂多机系统的分析和控制问题。

1.3.2 电力系统分析的基本方法

1.3.2.1 电力系统的基本特征与数学关系

常常被人们忽略的是，电力系统具有一些不同于其他动态系统的突出特征，如采用50Hz正弦波输电、三相基本对称等，只有在故障和扰动下才出现一些非工频量，其稳定性主要与0~50Hz范围内特别是50Hz工频时的系统特性有关，等等。由于这些基本特征产生了相应的数学关系，使得电力系统分析方法在秉承一般动态系统基本分析方法的基础上，在具体实现方法和形式上进行了不同程度的改变与发展，形成了具有电力系统特色的分析方法体系。下面对此做一个简要的介绍。

1. 正弦交流输电与相量分析

采用50Hz（在美国等国家是60Hz）正弦交流输电是电力系统最基本的特征，因此与其电源连接的电网侧（习惯性也称为定子侧）电气量的稳态响应都是50Hz正弦量，机械侧变