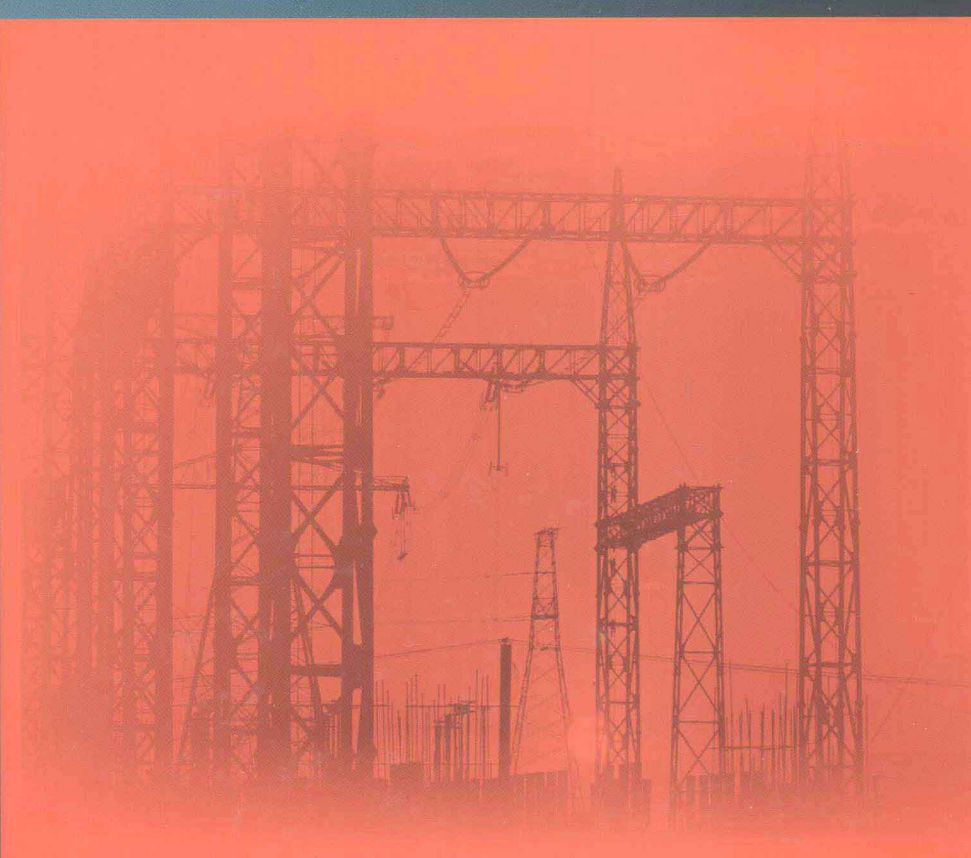


电力系统暂态稳定的 能量函数分析

——网络结构保持模型

刘 笙 陈 陈 编著



科学出版社

电力系统暂态稳定的能量函数分析

——网络结构保持模型

刘 笙 陈 陈 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是关于电力系统暂态稳定分析与应用相结合的专著,反映了当前国际前沿的研究成果,同时包含作者及所在研究团队多年研究的积淀。本书以网络结构保持模型为主线,依托现代非线性动力学系统理论,对电力系统(微分-代数系统)的暂态稳定域有比较深入的分析,对稳定域边界的判定着重论述了 PEBS 及 BCU 两大主要方法,并推广了出口点判据;依托李雅普诺夫-波波夫方法以及首次积分方法论述了多机系统能量函数的构造方法;在应用方面强调了能量函数法与时域仿真的互补性、同步与稳定的区分,突出了在线动态安全分析与控制上的应用、TCSC 控制策略设计,以及基于 PMU 与能量分析的在线失稳预警等方面的研究成果。

本书适合于高等院校电力系统及其自动化专业与自动控制专业的高年级学生、研究生及教师阅读,同时对从事电力系统工程研究与应用的工程师也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统暂态稳定的能量函数分析:网络结构保持模型/刘笙,陈陈编著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-039327-2

I. ①电… II. ①刘…②陈… III. ①电力系统稳定—系统暂态稳定—函数—分析 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 300940 号

责任编辑:汤 枫/ 责任校对:钟 洋
责任印制:张 倩/ 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

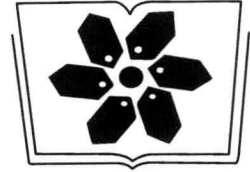
2014 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:302 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

前 言

改革开放以来,我国国内生产总值增长快速,目前已成为全球第二大经济体。电力系统也经历着跨越式发展。20世纪80年代,由于省网的互联我国步入500kV区域电网发展阶段。90年代葛洲坝水电站的兴建促成了华中、华东联网,从此步入大区联网阶段。我国已经建成的宏伟的三峡工程,装机容量达2240万kW,供电范围达8省1市,成为全国电网的中心,从而进一步促进了大区电网间的互联。在构建坚强的智能电网方面,我国已成为特高压交流输电技术(1000kV)的国际领跑者。根据国家电网公司提出“西电东送,南北互供,全国联网”的发展战略。21世纪前20年为全国联网阶段,全国联网的推进有利于全国能源资源的优化配置,也有利于全国统一电力市场的形成。同步系统容量的巨型化,必将对安全监控提出更高要求,电力传输的开放将引起动态管理拥挤问题。在电力系统快速发展的同时,国际大型电力系统大面积停电事故给我国电力系统调度运行敲响了警钟。其中最具代表性的2003年8月14日美加大停电,影响美国8个州及加拿大2个省近5千万人,约有63GW负载中断,震惊了全世界。再如欧洲的大停电:2003年9月23日丹麦东部及瑞典南部系统的解列,仅几秒钟,孤岛电压及频率崩溃导致大停电,使6550MW负载中断,影响近4百万人。近20年来,我国区域电网及省网事故时有发生,如1994年5月25日南方电网瓦解事故、2006年7月1日华中电网振荡事故等。这些国内外事故的发生说明了研究在线动态安全监控及其理论基础,即非线性电力系统暂态稳定性问题已不只是理论问题而是与工程实践紧密相连的。以上事故的发生有力地推动了现代能量管理系统中计入动态安全分析功能,以便快速显示偶然事故后的暂态稳定度及指示校正作用。数值积分方法仍然是最可靠的解法,但不适用于大量偶然事故的在线计算。直接方法也就是暂态能量函数方法,因能够定量度量稳定度及卓越的筛选功能而成为仿真方法的重要补充。两者的互补成为在线应用的最佳选择。

电力系统是高维非线性大系统。高维非线性动态系统的稳定性分析在微分动力系统领域仍属研究前沿,也不像线性系统那样具有封闭解。相平面分析法仅适用于二阶系统,高阶系统分析仍有待研究。19世纪提出的李雅普诺夫直接法是非线性系统稳定性理论的重大发展。李雅普诺夫函数乃是能量函数的推广。20世纪中叶罗马尼亚科学家波波夫(Popov)提出的绝对稳定理论把一类非线性系统稳定性分析提高到一个崭新的高度。多机系统能量积分的论文最早发表于20世纪

中叶的英国,直至 60 年代李雅普诺夫意义上的电力系统稳定分析的论文才得以发表。李雅普诺夫直接法在电力系统中的应用初期的结果是保守的。20 世纪 70 年代,美国、日本等国家研究的暂态能量函数方法克服了李雅普诺夫直接法的保守性。近 40 年来,暂态能量函数方法是电力系统研究领域活跃的分支,国内外发表了大量的论文。从最初的经典电力系统模型发展到网络结构保持模型,从经典能量函数发展到结构保持能量函数;稳定域的估计方法从启发发展到分析,即运用现代非线性动力学系统理论,可以展示故障后系统稳定平衡点的吸引域的完全拓扑特征。在应用方面,直接法与仿真方法的互补能够有效地运用于大型电力系统的在线动态安全分析与监控。本书根据 20 世纪 90 年代中期至 21 世纪前 10 年国内外最有影响的文献整理而成,包含了作者及所在团队的研究成果,希望本书的出版有助于这一领域系统化的学习与研究工作的深入。

本书共 12 章。第 1、2 章为绪论与入门;第 3、4 章为基础部分,包括运动稳定性理论与电力系统经典模型;第 5~8 章为核心部分,包括结构保持能量函数、同步平衡与稳定平衡、暂态稳定域分析与计算方法;第 9~12 章为应用部分,包括能量裕度灵敏度分析、在线动态安全分析的混合方法、TCSC 控制策略,以及基于 PMU 与能量分析的在线失稳预警。

本书内容具有以下一些特点:

(1) 以网络结构保持模型为主线,使理论分析更为贴近工业实际。

(2) 电力系统暂态稳定域的分析,依托现代非线性动力学系统理论。先叙述经典模型(微分方程系统),再阐述如何从经典模型推广到结构保持模型(微分-代数系统)。

(3) 与理论匹配的计算方法侧重于 BCU 与 PEBS 方法,把 PEBS 方法看成 BCU 方法的第一级。

(4) 在应用方面突出在线动态安全分析与监控,侧重于直接法与仿真方法的互补性,以及能量准则在 TCSC 控制、基于 PMU 的失稳预警等方面的应用。

(5) 在基础理论方面阐述了李雅普诺夫经典理论与波波夫绝对稳定理论。

本书是一本基础理论与专业应用相结合的专著,适合于高等院校电力系统及其自动化专业的研究生及教师阅读,也可供从事非线性动态系统工作的研究人员、电力系统专业工程师参考。

本书的第 11、12 章及附录 D 由陈陈撰写,其余部分由刘笙撰写;全书由刘笙审定。本书能够得以完成与研究团队的青年教师于奇志、解大及研究生宋志东、董传友、阮前途、王向平、张康红、郑晖、陶炜、汪冰、李政道、赵庆生等的勤奋工作是分不开的。对电力系统能量函数的构造本书论述了两种方法:一种是波波夫方法,在这方面承谢惠民博士指导;另一种是多机能量积分方法,在这方面参考了印度学者

Padiyar 教授的文献。在现代电力系统暂态稳定域的理论及应用方面,参考了华裔美籍学者 Chiang 教授的文献,并承蒙指导。第 8 章中有关结构保持模型下出口点准则的推广承顾圣士教授指导,第 7 章的部分内容由汪静副教授参与撰写初稿。在此一并向他们致以衷心的感谢。

本书得到中国科学院科学出版基金的资助。在出版过程中得到卢强教授和韩祯祥教授的指导,在此均深表感谢。

由于作者学识水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统在线动态安全评定	1
1.2 电力系统暂态稳定及其在线分析方法	3
1.3 电力系统数学模型	7
参考文献	9
第 2 章 简单电力系统暂态稳定的能量函数分析	11
2.1 系统结构与分析假定	11
2.2 单机无穷大功率母线系统	11
2.2.1 相平面分析与能量函数方法	12
2.2.2 等面积定则与能量函数方法	21
2.3 两机系统	26
2.3.1 相对加速度方程	27
2.3.2 两机系统的能量函数	29
2.4 小结	30
参考文献	30
第 3 章 运动稳定性理论的回顾与应用	31
3.1 引言	31
3.2 系统描述、平衡态及其稳定性定义	32
3.3 李雅普诺夫方法	37
3.3.1 辅助函数的符号确定性	38
3.3.2 稳定性定理	39
3.3.3 稳定性定理的几何解释	44
3.4 平衡点渐近稳定的吸引域	45
3.5 拉萨尔方法	49
3.6 非线性系统方程辅助函数的构造(首次积分方法)	50
3.7 李雅普诺夫函数的存在性	55
3.7.1 波波夫不等式	55
3.7.2 卡尔曼-雅可鲍维奇定理	57
3.7.3 安德森定理	58
参考文献	59

第 4 章 多机电力系统的经典模型及其暂态能量函数	61
4.1 引言	61
4.2 系统运动方程	62
4.3 状态空间模型(发电机角度参考坐标)	66
4.4 暂态能量函数(发电机角度参考坐标)	68
4.5 状态空间模型(角度中心参考坐标)	73
4.6 暂态能量函数(角度中心参考坐标)	76
4.7 基于现代控制理论的系统状态方程的最低阶次	80
4.7.1 系统状态方程与可控制性、可观测性	81
4.7.2 按最小实现描写系统状态方程	86
4.8 经典模型的局限性	89
参考文献	90
第 5 章 电力系统结构保持模型下的暂态能量函数	92
5.1 引言	92
5.2 发电机 E'_q 恒定的网络结构保持模型	93
5.3 发电机 E'_q 变化的网络结构保持模型	97
5.4 发电机的 E'_q 及 E'_d 变化的网络结构保持模型	99
5.5 基于 Park 方程的模型	103
参考文献	106
第 6 章 故障后电力系统的同步平衡与稳定平衡	108
6.1 引言	108
6.2 同步与稳定	108
6.3 平衡点的求解方法	109
6.3.1 系统方程	110
6.3.2 同步平衡点的求解	110
6.3.3 稳定平衡点的求解	112
6.4 实例	114
6.5 小结	116
参考文献	116
第 7 章 非线性电力系统暂态稳定域分析	117
7.1 引言	117
7.2 不变集与吸引域	120
7.3 稳定域边界理论	122
7.3.1 动力学系统的一些基本概念	122
7.3.2 对动力学系统的基本假设	123

7.3.3 稳定边界特征	125
7.4 稳定域估计方法	126
7.4.1 主导不稳定平衡点方法	127
7.4.2 超切平面方法	129
7.4.3 位能边界曲面方法	133
7.4.4 基于稳定域边界的主导不稳定平衡点方法	139
7.5 微分-代数系统的稳定域的分析基础	144
7.6 微分-代数系统的稳定域估计方法	146
7.7 能量函数理论与 BCU 方法	146
参考文献	147
第 8 章 直接暂态稳定评定的计算方法	150
8.1 引言	150
8.2 故障后的稳定平衡点	151
8.3 PEBS 方法的稳定评定	151
8.3.1 位能边界曲面的构造方法	152
8.3.2 位能脊法	153
8.3.3 网络结构保持模型下的 PEBS 方法	154
8.4 BCU 方法的稳定评定	161
8.4.1 CUEP 的特征	162
8.4.2 网络结构保持模型下的 BCU 解法	164
8.4.3 实例	167
参考文献	173
第 9 章 能量裕度的灵敏度分析	175
9.1 引言	175
9.2 灵敏度分析的一般方法	176
9.3 关于能量裕度灵敏度的解析问题	178
9.4 结构保持模型下基于灵敏度的 BCU 方法	179
9.4.1 暂态能量裕度一阶灵敏度计算	180
9.4.2 灵敏度系数的计算方法	181
9.5 基于二阶解析灵敏度的 BCU 方法简述	182
9.6 实例	183
9.7 网络接口流稳定极限的决定	185
参考文献	187
第 10 章 在线动态安全评定的混合方法	189
10.1 引言	189

10.2	在线动态安全评定的策略·····	190
10.3	偶然事故筛选与分类·····	190
10.3.1	对分类器的要求·····	191
10.3.2	PEBS/BCU 分类器·····	191
10.4	动态仿真与稳定评定·····	192
10.5	IEEE 50 机系统算例·····	193
10.6	扩展等面积方法·····	196
	参考文献·····	200
第 11 章	可控串联电容补偿·····	202
11.1	晶闸管控制的串联电容器·····	202
11.2	TCSC 的稳定控制策略·····	203
11.2.1	TCSC 对系统暂态稳定的影响·····	203
11.2.2	单机无穷大母线系统 TCSC 的稳定控制策略·····	205
11.3	仿真分析·····	206
11.4	动态模型实验结果·····	210
11.5	TCSC 在多机系统中的应用·····	213
	参考文献·····	214
第 12 章	基于相量测量与能量分析的在线失稳预警·····	216
12.1	引言·····	216
12.2	系统模型·····	217
12.3	故障时轨线的自适应跟踪与预测算法·····	218
12.3.1	机动目标自适应跟踪算法的运用·····	218
12.3.2	机动目标的“当前”统计模型·····	218
12.3.3	自适应跟踪算法·····	219
12.3.4	故障时轨线的预测算法·····	220
12.4	系统稳定判别的暂态能量函数方法·····	220
12.5	实例·····	221
12.6	小结·····	224
	参考文献·····	225
附录 A	发电机磁场储能项的表达式·····	227
附录 B	机网接口模型·····	229
附录 C	Gear 方法简介·····	231
附录 D	计入 HVDC 的 TEF 方法·····	234

第 1 章 绪 论

本章论述电力系统安全评定的内涵及其在系统运行中的重要地位。电力系统动态安全评定的主要组成部分是暂态稳定分析。在各种暂态稳定在线分析方法中,新兴的暂态能量函数方法以其能够定量度量稳定程度、适合于灵敏度分析和对极限参数计算快速而著称,因而得到较多的关注,成为仿真方法的一种重要补充,而不是代替仿真方法。本章进一步论述暂态能量函数方法所采用的数学模型,即电力系统经典模型、网络结构保持模型与网络降阶模型;最后介绍暂态能量函数方法的主要文献。

1.1 电力系统在线动态安全评定^[1,2]

电力系统的互联形成互联电力系统(interconnected power system),可以带来显著的技术经济效益。例如,经济合理地利用一、二次能源。但是电力系统的规模越大,互联的部分越多。系统中任一元件发生故障,都有可能引起事故扩大。如果电网结构不够强壮,或者安全自动装置不够健全,或者管理失当,都有可能使系统陷入稳定危机(stability crisis)或生存危机(viability crisis),造成系统稳定破坏甚至大面积停电,乃至全网崩溃,给国民经济造成重大损失。近 40 年来,国内外电力系统大面积停电事故频发,其中最具有代表性的 2003 年 8 月 14 日美加电网崩溃事故,影响近 5 千万人口的广大区域,近 63GW 负载中断,震惊了全世界。据北美可靠性协会的研究,在“8·14”事故发生的初期,PE 公司的 SCADA 失效,中西部系统的状态估计及实时偶然事故分析软件因故障未运行,阻碍了对该系统的早期预警。可见,对于大型电力系统的运行,运用在线动态安全评定(on-line dynamic security assessment)作为预防控制与校正作用的手段是何等的重要。

20 世纪 70 年代,我国许多 110kV 地方电网的互联迅速发展为 220kV (330kV)省网,由于电网结构不尽合理,1970~1980 年全国每年平均发生稳定破坏事故 19.1 次^[3],其中暂态稳定破坏事故占 72.8%。为此,曾经积极地进行了电网稳定的总结工作。从我国电力系统运行稳定性的经验来看,可归结为三个基本条件的实现:第一个条件是必须具备合理的电网结构;第二个条件是必须用快速继电保护和自动装置防止不稳定;第三个条件是改善电力系统运行稳定性的管理。20 世纪 80 年代,由于省网的互联我国步入 500kV 区域电网阶段,全国形成东北、华北、华东、华中、西北、南方 6 个区域电网及一些省网,大区电网的装机容量已达 40 000~

130 000MW^①。由于电网结构的改善、安全自动装置的配备和管理的加强,1981~1990年全国每年平均发生稳定破坏事故已降为6.09次^[4,5],其中暂态稳定破坏事故占95.7%。1990~2010年为大区电网互联阶段,葛洲坝水电站与上海南桥变电站间500kV直流输电线的开通,实现了华中、华东联网。已经建成的三峡工程,装机容量2240万kW,500kV交(直)流输电出线达到14~17回,供电区域达8省1市,成为全国电网的中心,从而进一步促进了大区电网间的互联。2010~2020年全国联网阶段,由于能源资源多分布于中西部,而负荷大多集中于东南沿海及环渤海湾,国家电网公司为此提出“西电东送,南北互供,全国联网”的发展战略。全国联网的推进,必将促进全国能源资源的优化配置与全国统一电力市场的形成,但超大容量同步系统的形成,对于预防事故的发生,必将提出更高的要求。纵观20世纪90年代至21世纪前10年,我国区域电网及省网事故时有发生,如1994年5月25日南方电网瓦解事故、1995年12月15日广东电网稳定破坏事故、2005年9月26日海南电网瓦解事故,以及2006年7月1日华中电网振荡事故等。这些事故说明了预防控制的迫切性。随着我国电力系统容量的不断增长,由于电网建设滞后于电源建设,电网结构相对薄弱。由于厂网分离竞价上网,现有传输走廊潮流增长压力显著增加。不少系统运行在接近于暂态稳定极限,一些受端系统则缺少充分的电压支撑。在这些系统中既涉及暂态功角稳定问题又有电压稳定问题。处于极限条件下的系统的成功运行,要求掌握受稳定支配的极限参数,如最大的线路承载能力、临界的负载节点电压等,而这些安全的警戒线取决于系统的暂态稳定行为。由于以上多种原因,调度部门存在一贯压力,要求扩展能量管理系统(EMS)计入动态安全评定与控制。因为离线分析的预设数据是保守的,而在线分析运用实时数据能够带来显著的经济效益,所以在线动态安全评定对于提高我国大型电力系统的安全稳定运行水平具有重要意义。

随着偶然事故的发生,电力系统能否经受住随后发生的暂态,过渡到一种新的稳态条件,以及在这种新的稳态条件下所有电力系统元件是否运行在规定的极限参数以内,是电力系统安全评定的主要内容。用暂态分析方法评定系统能否经受住这种过渡过程属于动态安全评定(dynamic security assessment)的范畴;检验新的稳态条件是否可以接受属于静态安全评定(static security assessment)的范畴。若评定表明某些不理想条件的出现将对电力系统的安全构成威胁,则必须采取校正措施。因此,随着“评定”涉及“控制”,作为校正作用先于偶然事故发生的,称为预防控制(preventive control);或者在偶然事故发生之后采取紧急控制(emergency control)。电力系统静态安全评定是对稳态网络基于快速潮流求解的结果,检验内容包括:

- (1) 电力系统元件的负荷是否超过发热允许的定额;

^① 国家电力公司. 新中国电力五十年. 北京:中国电力出版社,1999

- (2) 母线电压是否处于规定的极限范围以内;
- (3) 联络线端点电压间的夹角是否处于规定的范围以内。

电力系统动态安全评定运用动态系统的行为模型和分析工具,有3种动态安全问题:

- (1) 同步稳定性问题,包括动态(小扰动)稳定和暂态(大扰动)稳定问题;
- (2) 由有功功率严重不平衡导致的系统频率稳定问题;
- (3) 由无功功率严重不平衡导致的系统电压稳定问题。

国内外电力系统稳定破坏事故统计表明,暂态稳定破坏的事故率居于首位,从而暂态稳定分析(transient stability analysis)成为动态安全评定的主体。

运行中的系统需要检测某些故障造成系统脆弱、导致系统分离以及因事故扩大可能造成的严重后果,要求对偶然事故的暂态行为提供实时或近实时的信息,如显示系统的稳定度、某一时刻事故的后果以及避免事故扩大需采取的措施等,而这种需求现在是远不能满足的。事实上我国的一些大区电网及省网在20世纪80年代已经成功地引进了现代控制中心的EMS,已具备若干基础功能^①,这为在线暂态稳定分析提供了良好的环境。从静态安全分析(SSA)到动态安全分析(DSA)需要在分析计算方法、测量系统、控制方案方面有所突破。在线DSA涉及对偶然事故的稳定评定,涉及大量非线性微分方程与代数方程的求解,计算量远高于SSA,要求在可靠性及速度方面有所突破。这也是DSA长期处于离线状态的原因。

1.2 电力系统暂态稳定及其在线分析方法

电力系统暂态稳定问题是指系统在正常运行状态下经受大扰动后,随着时间的增长是否趋于可接受的稳态,维持同步。大扰动是指运行条件或系统参数的一种剧烈变化。随着扰动的发生,系统中的故障参量将作用于继电保护装置,它可以改变电力系统的结构。系统所达到的故障后的稳态,可以显著地不同于故障前的稳态,极端情况下也可以是一种不能接受的运行模式,如运行参数严重偏离允许范围。因此,当电力系统达到一种可以接受的稳态时,才被认为是暂态稳定的。

当所有连接在系统中的同步机组处于同步并联运行中,则称该电力系统是同步运行的。当系统中一台(群)同步机组相对于其余机组滑极失步,则表示系统不稳定。我国《电力系统安全稳定导则》规定^[6~8]:“在正常运行方式下,系统中任一元件发生单一故障时,不应导致主系统发生非同步运行。”电力系统安全运行最重要的是避免失控的、广延的级联跳闸而引起电力中断。如何能使一网架结构较弱的系统达到这一目标?可以根据不同国情采取不同的方法,例如,发达工业国家采

^① 这些基础功能包括 SCADA、AGC、NB、DB(HABITAT)、SE、DPE 及 SSA 等。

用强化网络的方法。我国《电力系统安全稳定导则》规定：电力系统发生大扰动时的安全稳定标准因电网结构与故障严重程度不同分为4种情形：

(1) 对于一些较易发生的单一故障，如单相接地等，系统必须保持稳定运行和正常供电；

(2) 对于一些较少发生的单一故障，如三相短路等，系统必须保持稳定运行，但允许损失部分负荷；

(3) 对于一些较严重的复故障，当系统不能保持稳定运行时，必须防止系统崩溃，并尽量减少负荷损失；

(4) 在故障不导致系统重要设备损坏时，允许局部系统作短时间的非同步运行。

这种因故障严重程度和出现概率的不同而采取的分级安全稳定标准，对于一个网架结构相对薄弱的系统在技术经济上被认为是合理的。

直观的系统失步检查可借助于系统中各发电机组的暂态过程中的转子角度随时间变化的曲线。图 1.1(a) 表示一系统是暂态稳定的；图 1.1(b) 表示一不稳定的系统。通常同步机的转子角是相对于一同步旋转坐标而度量的。若一台同步机组趋向于不稳定而失步，该机组相对于其他机组的角速度将继续增加，这意味着该机组的转子角从系统中其余的同摆机组中拉开。检测系统稳定与否是机组间的相对转子角而不是绝对转子角。若经历暂态后系统是稳定的，则它可以恢复到系统的原有频率或者稳定到一新的频率。前者称为频率平衡(frequency equilibria)；后者称为同步平衡(synchronism equilibria)。

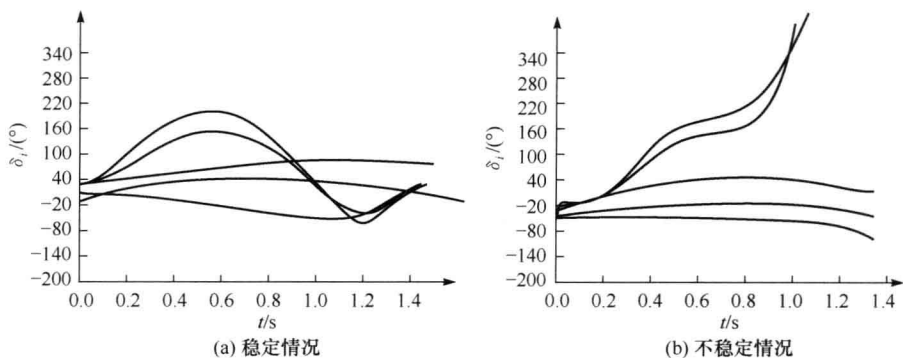


图 1.1 发电机转子角度-时间曲线

处于大扰动下的电力系统，其固有的非线性是不能忽略的，这种情况下的稳定分析构成即通常所说的暂态稳定分析。描述系统的数学模型是一组非线性微分方程

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) \quad (1.1)$$

式中, $\mathbf{x}(t)$ 是在 t 时刻系统的状态变量的向量; \mathbf{f} 是函数向量。

经受大扰动的电力系统实际上经历 3 个不同的阶段。

1) 故障前系统

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}^{\text{BF}}(\mathbf{x}), \quad t \leq 0 \quad (1.2)$$

此时系统处于故障前的稳定平衡状态 $\mathbf{x}(0)$, 记为 \mathbf{x}_s^{BF} , 由解方程(1.2)而得到。

2) 故障时系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}^{\text{F}}(\mathbf{x}), \quad 0 < t \leq t_c \quad (1.3)$$

其初始条件为 $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_s^{\text{BF}}$ 。从故障发生时刻($t=0$)至故障清除时刻($t=t_c$)称为故障时阶段。故障时系统的过渡过程由解方程(1.3)而得到。实际上故障清除以前在网络中可以有若干个操作, 每一操作将导致不同的 \mathbf{f}^{F} 。这里从 $t=0$ 至 $t=t_c$ 采用了简化的单一结构的表示方法。

3) 故障后系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}^{\text{PF}}(\mathbf{x}), \quad t_c < t < \infty \quad (1.4)$$

具有初始条件 $\mathbf{x}(t_c) = \mathbf{x}_c$ 。故障清除以后($t > t_c$)的阶段称为故障后系统。故障后系统的动态过程由解方程(1.4)而得到。

系统的暂态稳定问题: 若系统(1.4)具有一稳定平衡状态 \mathbf{x}_s^{PF} , 则从故障后的初始状态 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_c$ 开始, 故障后系统的轨线 $\mathbf{x}(t)$ 随着 $t \rightarrow \infty$ 将逐渐收敛到稳定平衡状态 \mathbf{x}_s^{PF} 吗? 换言之, 故障后系统的轨线的初始点(即故障时系统轨线的终点)是否处于一可以接受的稳定平衡点的稳定域 $A(\mathbf{x}_s^{\text{PF}})$ 内?

求解电力系统暂态稳定问题的方法有两种: 一是时域仿真法(time domain simulation method); 一是直接法(direct method)。时域仿真法是现今求解暂态稳定问题的主要方法, 也是最可靠的方法, 就是对故障时及故障后系统方程进行数值积分, 求取非线性微分方程组的近似解。目前的数值积分程序已达到相当可观的水平。其主要优点是: ①系统模型足够精致, 在规模上可包含几千条母线、几千条线路、几百台发电机组以及各种控制和保护装置的详尽模型, 可得到相当准确的结果; ②能够提供系统各种变量的时间响应, 并已有许多商业性程序相继问世, 如中国电力科学研究院编制的交直流电力系统综合计算程序、BPA 开发的暂态稳定分析程序、加拿大 IREQ 的暂态稳定程序、PTI 开发的 PSSE、TRACTEBEL/EDF 开发的 EUROSTAG 及德国的 VISTA 程序等。但计算量非常大, 需用较长的机时, 而在线应用感兴趣的时间尺度仅在几秒以内。现今一种超快速的时域仿真法, 即借助于新的计算硬件包括并行处理机的方法, 正在研究。在计算方法上要求并行计算发电机方程、控制器方程及网络方程, 对中等规模网络的仿真可达到软实时的效果。这种方法的限制是不易导出稳定程度的定量信息和对系统关键参数的灵敏度分析。

另一种方法是基于现代微分动力系统理论的直接法,也就是暂态能量函数方法(transient energy function method)^[9~13]。这种方法的一般描述如下:用系统的状态变量表示的暂态能量函数(TEF)描述系统在故障时阶段及故障后阶段不同时刻系统的暂态能量。这种暂态能量由故障所激发,并在故障阶段所形成。暂态能量包括动能和位能两个分量。暂态动能或称异步动能是由故障造成系统分离的能量;暂态位能并非通常机械学意义下的位能,而是更为广义的,它包括位置能量(联系到暂态中发电机的功角)、磁能(联系到发电机、负载和网络中的磁场储能)和耗散能量(联系到网络中的转移电导和负载中的有功功率)。当故障发生时,系统的暂态动能和位能显著增长;在故障清除时刻,动能开始降低而位能继续增长;在故障清除之后,全部能量是守恒的(计入阻尼则将逐渐衰减)。故障后的系统经历了由动能转换为位能的过程,若系统能够吸收剩余动能,则系统稳定;相反,若系统不能吸收剩余动能,则系统不稳定。因此,在临界清除时间下,故障后系统所能达到的顶值位能是系统能够吸收的最大能量,这一顶值位能称为临界能量 V_{cr} 。

暂态能量函数方法不需积分故障后系统而是通过将故障阶段的末了(故障清除时刻)的系统暂态能量 V_{cl} 与临界能量相比较,直接评定系统的暂态稳定性。两者之差称为能量裕度(energy margin),即稳定裕度(stability margin),通常表示为

$$\Delta V = V_{cr} - V_{cl} \quad (1.5)$$

能量裕度不仅与系统的失步行为相关联,而且与系统暂态行为中其他的关键参数相关联,如振荡中心及其附近的暂态电压下沉(voltage dip)^[14]、失步继电器所反映的视在摇摆阻抗(apparent swing impedance)^[15]等。这种方法的主要优点是:①能够提供系统稳定程度的定量信息;②能够提供系统稳定裕度对系统关键参数或运行条件变化的灵敏度分析;③对极限参数计算速度快,可快速扫描系统暂态过程。这种方法的模型能力目前在等效的意义上已与详细模型相当。目前在结构保持模型下用直接法分析第一摇摆周期以及多摆周期稳定性的方法已日趋成熟,并已推出一些商业性的软件包,如美国的 TEPCO-BCU、巴西 Catarina 大学的 IPEBS、英国帝国理工大学的 IC-PEBS、比利时 Liege 大学及我国南京自动化研究院的 EEAC 等^[16,17]。

两种方法的比较如表 1.1 所示。从表中可见,暂态能量函数方法作为时域仿真方法的一种重要补充,并不代替仿真方法^[16~18]。直接法与时域法具有互补性,两者的联合是最好的方法。直接法在多数情况下用以强化时域解,仅在一些特殊运用条件下如在线(on-line)或近实时应用时展现其特有功能^[19]。实际上在线暂态稳定分析方法可以归纳为两类:一类是能量函数方法与时域仿真互补的混合法;一类是人工智能(AI)方法,如专家系统、决策树、图像识别及人工神经网络方法等。在动态安全评定(在线)中能量函数方法主要承担预处理及后处理功能,即对偶然事故筛选分类,可以显著地提高评定效率,在后处理中给出能量裕度和临界清