

# 电力系统暂态稳定的能量函数分析

刘 笙 汪 静 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 简 介

电力系统暂态稳定的能量函数分析是非线性电力系统研究领域中的一个十分活跃的分支。近十余年来国内外学术界在函数构造、稳定域估计和在动态安全分析与控制方面的应用研究发展迅速,已有大量文献发表。暂态能量函数方法因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从而成为仿真方法的一种重要补充,尤其是在在线应用与近实时应用。为了拓宽研究生的知识面,本教材根据80年代中期至90年代国际国内最有影响的文献,分成10章加以阐述:第1章叙述背景知识,第2章讨论简单电力系统,第3、5章讨论非线性动态系统稳定域的经典及现代理论,第4、6章论述多机电力系统的经典模型,第7章论述灵敏度分析,第8、9章论述结构保持模型与大系统降阶模型,第10章讨论应用。

本书为适合教学需要,首先叙述背景知识,由浅入深,顺序前进。从简单系统入手再讨论多机系统:从经典模型开始再讨论结构保持模型与降阶模型。本书兼顾理论分析与实用方法。对灵敏度分析与在工业系统中的应用列出专门章节加以阐述。不少章节附有实例分析结果。只要具备电力系统暂态分析基本知识的读者都能顺利理解本书的内容。本书除可作为电力系统及其自动化专业的研究生教材外,也可作为高年级本科生、自动控制专业的研究生和电力部门工程师的参考读物。

责任编辑 周孟霞

封面设计 倪宇峰

### 电力系统暂态稳定的能量函数分析

刘笙 汪静 编著

上海交通大学出版社·出版

(上海市华山路 1954 号 邮政编码 200030)

新华书店上海发行所·发行

上虞市科技外文印刷厂·印刷

开本: 787×1092(毫米) 1/16 印张: 14 字数: 343000

版次: 1996年4月 第1版 印次: 1996年5月 第1次

印数: 1--1200

ISBN 7-313-01622-0/TM·097

定价: 11.10 元

# 序 言

随着电力系统容量和地域的扩展、单机容量的增大、输电电压的提高以及系统间的互联，带来显著的技术经济效益。但也易随之引起事故波及。至关重要的是要防止广延的、失控的事故波及，以免造成重大的社会经济影响。当电网建设滞后于电源建设，造成网架结构相对薄弱，线路承载度高，迫使系统在接近于暂态稳定极限下运行。处于极限条件下系统的成功运行，要求掌握受稳定支配的极限参数，如最大的线路承载能力、发电厂的受载极限等。对于运行情况的变化以及偶然事故的威胁，要求快速显示稳定度以及指示校正作用，以便减轻不稳定的威胁。所有这些情况表明：人们有理由在现代能量管理系统中不满足于具有静态安全分析功能而希望引入动态安全分析功能。数值积分方法仍然是最可靠的方法，但在线应用时计算负担较重。直接方法也就是暂态能量函数方法因其能够定量度量稳定度、适合于灵敏度分析以及对极限参数计算快速，从而成为仿真方法的一种重要补充。

电力系统是本质非线性的大系统，而非线性动态系统的稳定性分析不仅在电力系统领域即便在更为广泛的自动控制领域、数学分析中的微分动力系统领域也属研究前沿。这是由于非线性系统稳定性分析不像线性系统那样具有普遍的封闭形式的求解方法。现代教科书上的相平面法只适用于二阶系统。高阶系统应用它不仅困难也失去直观性。早在18世纪天体力学家就用暂态能量度量稳定性。19世纪提出的李亚普诺夫直接法是非线性系统稳定性理论的重大进展。所谓李亚普诺夫函数乃是物理“能量”的升华。20世纪30年代前苏联学者不仅运用Park方程研究高压远距输电，也提出用能量准则分析电力系统稳定。50年代在英国最早出现多机系统能量积分的论文，直至60年代下半叶才出现在李亚普诺夫稳定意义上的电力系统稳定分析的论文。其后的研究表明用李法得出的结果是保守的。70年代末期在美、日等国提出的暂态能量函数方法克服了李法的保守性。近十年来暂态能量函数方法一直是电力系统研究领域中的一个十分活跃的分支，国际上发表了大量论文。经过国内外学者的潜心研究，最近构造出的暂态能量函数已达到比较精致的程度，稳定域的估计方法已从启发、仿真发展到分析，即基于现代非线性动力学系统理论，可以展示事故后稳定平衡点的吸引域的完全拓扑特征。在应用方面增强了时域仿真在计算稳定裕度和决定极限参数方面的能力。本书根据80年代中期至90年代最有影响的文献整理而成。也包括主编者及其研究组近年来的工作如结构保持模型下的PEBS判据、结构保持模型下的混合暂态稳定分析、及暂态能量函数方法在运行与系统规划中的应用等。希望这将有助于这一领域有关内容的学习与研究工作的深入。

本书在内容编排方面突出以下几个方面：

在电力系统暂态稳定的分析方法中着重比较了仿真方法（数值积分）与直接方法（暂态能量函数方法）的不同特征。作为入门，在简单电力系统暂态稳定的能量函数分析中着重说明等面积定则（能量函数的图形表示）、相平面法与李亚普诺夫方法的一致性。

在基础理论方面着重阐述李亚普诺夫方法的基本概念，如平衡态的稳定性、辅助函数的符号确定性与构造辅助函数的首次积分方法。而在稳定域估计理论方面则着重于现代非线性动力学系统稳定域的边界特征与估计方法。

在阐述多机电力系统模型方面分为三个层次,即经典模型、结构保持模型与大系统降阶模型以及相应的能量函数。经典模型下的稳定域估计着重阐述现代流行的几种方法即BCU方法、PEBS方法、EEAC方法以及HYBRID方法等。结构保持模型分为几个层次直至详细的Park方程模型。在降阶模型方面除重点阐述EEAC方法而外介绍了时间尺度方法与割集能量准则等。

在实用计算方面着重阐述稳定评定的具体步骤,如轨线计算方法、出口点判定方法与主导不稳定平衡点求解方法。对于暂态能量裕度对系统关键参数的灵敏度分析,求取极限参数的方法曾列出专门章节加以讨论。对于暂态能量函数方法在工业系统中的应用着重阐述了在动态安全分析中应用TEF方法的准则。

为适应教学需要,本书编排由浅入深,顺序前进,兼顾理论基础与实用方法。书中主要章节经过多届研究生试用,能使读者较快进入这一领域的前沿。

本书可作为电力系统及其自动化专业研究生的选修课教材,亦可作为高年级本科生、自动控制专业的研究生以及电业部门有关专业的工程技术人员的参考读物。

本书的第5章由汪静编写初稿,其余各章由刘笙编写,刘笙主编全书。本书能够写成与主编者的研究生宋志东、董传友、于奇志、阮前途、王向平、郁薛春、沈萌及张康红等在这一领域的勤奋工作分不开的;本书承吴际舜教授审阅了大部分章节,提出了不少宝贵意见;顾圣士教授参加了第5章的讨论与修改。教务处及电力工程系的领导为本书编写创造了条件并给予关心,在此一并向他们致以衷心的感谢。

借此机会向国家自然科学基金会致谢,因其资助使得本书得以出版。

由于编著者学识水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1995年4月于上海交通大学

# 目 录

<b>1 引论</b> .....	1
1.1 电力系统安全评定 .....	1
1.2 电力系统暂态稳定及其分析方法 .....	2
1.3 电力系统数学模型 .....	6
参考文献.....	7
<b>2 简单电力系统暂态稳定的能量函数分析</b> .....	10
2.1 系统结构与分析假定 .....	10
2.2 单机-无限大功率母线系统.....	10
2.2.1 相平面分析与能量函数方法 .....	11
2.2.2 等面积定则与能量函数方法 .....	20
2.3 两机系统 .....	24
2.3.1 相对加速度方程 .....	25
2.3.2 两机系统的能量函数 .....	27
2.4 小结 .....	28
参考文献.....	28
<b>3 运动稳定性理论的回顾与应用</b> .....	29
3.1 引言 .....	29
3.2 系统描述、平衡态及其稳定性定义.....	30
3.3 李亚普诺夫方法 .....	34
3.3.1 辅助函数的符号确定性 .....	35
3.3.2 稳定性定理 .....	36
3.3.3 稳定性定理的几何解释 .....	39
3.4 渐近稳定域 .....	41
3.5 拉萨尔方法 .....	44
3.6 非线性系统方程辅助函数的构造(首次积分方法) .....	44
参考文献.....	47
<b>4 多机电力系统的经典模型及其暂态能量函数</b> .....	48
4.1 引言 .....	48
4.2 系统运动方程 .....	48
4.3 状态空间模型(发电机角度参考坐标) .....	52

4.4	暂态能量函数(发电机角度参考坐标).....	54
4.5	状态空间模型(角度中心参考坐标 COA) .....	58
4.6	暂态能量函数(角度中心参考坐标).....	62
4.7	基于现代控制理论的系统状态方程的最低阶次.....	65
4.7.1	系统状态方程与可控制性、可观测性 .....	65
4.7.2	按最小实现描写系统状态方程.....	70
	参考文献 .....	73
<b>5</b>	<b>非线性电力系统暂态稳定域分析</b> .....	<b>75</b>
5.1	引言.....	75
5.2	不变集与吸引域.....	77
5.3	稳定域边界理论.....	79
5.3.1	动力学系统的一些基本概念.....	80
5.3.2	对动力学系统的基本假设.....	81
5.3.3	稳定边界特征.....	82
5.4	稳定域估计方法.....	83
5.4.1	概念性主导不稳定平衡点方法 (controlling u.e.p. method) .....	84
5.4.2	超切平面方法(hyper tangent plane method) .....	85
5.4.3	位能边界曲面方法(potential energy boundary surface method).....	89
5.4.4	基于稳定域边界的主导不稳定平衡点方法 (BCU—boundary of stability region based controlling u.e.p. method) .....	95
	参考文献 .....	98
<b>6</b>	<b>电力系统暂态稳定域的实用计算</b> .....	<b>101</b>
6.1	电力系统暂态稳定评定.....	101
6.2	初始条件计算.....	102
6.3	网络节点导纳阵的形成.....	103
6.4	故障轨线及故障末条件的计算.....	104
6.5	事故后系统平衡点的计算.....	106
6.5.1	修正的牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson)方法 .....	107
6.5.2	牛顿(Newton)法 .....	108
6.6	临界能量值的确定问题.....	110
6.7	基于主导不稳定平衡点(c.u.e.p.)的方法.....	111
6.7.1	主导不稳定平衡点的概念.....	111
6.7.2	故障模式(MOD)方法 .....	112
6.7.3	基于稳定域边界的主导不稳定平衡点(BCU)方法 .....	115
6.8	基于位能边界曲面的方法.....	117
6.8.1	位能边界曲面的构造方法.....	117
6.8.2	位能“脊”(potential energy ridge)法.....	119

6.9	混合(Hybrid)方法 .....	120
6.10	实例结果 .....	122
	参考文献 .....	123
<b>7</b>	<b>暂态能量裕度的灵敏度分析 .....</b>	<b>125</b>
7.1	引言 .....	125
7.2	灵敏度分析的一般方法 .....	126
7.3	暂态能量裕度灵敏度的解析方法 .....	127
7.4	基于灵敏度的BCU方法 .....	133
7.5	暂态能量裕度灵敏度的数值摄动方法(接口流稳定极限的决定) .....	135
	参考文献 .....	136
<b>8</b>	<b>电力系统结构保持模型下的暂态能量函数方法 .....</b>	<b>138</b>
8.1	引言 .....	138
8.2	微分—代数系统 .....	139
8.3	发电机 $E'_q$ 恒定的网络结构保持模型 .....	139
8.3.1	事故后系统的同步平衡点 .....	144
8.3.2	暂态稳定域的计算方法 .....	150
8.4	发电机 $E'_q$ 变化的网络结构保持模型 .....	155
8.5	发电机 $E'_q$ 及 $E'_d$ 变化的网络结构保持模型 .....	157
8.6	基于Park方程的模型 .....	164
8.7	基于BCU的稀疏暂态能量函数方法 .....	167
	参考文献 .....	170
<b>9</b>	<b>降阶能量函数方法 .....</b>	<b>172</b>
9.1	分解—集结技术(decomposition and aggregation techniques) .....	172
9.2	扩展等面积准则 .....	173
9.3	基于模态分解的时间尺度能量方法 .....	176
9.4	单机能量函数方法 .....	179
9.5	成组机组的能量函数 .....	182
9.6	割集稳定准则 .....	183
	参考文献 .....	185
<b>10</b>	<b>暂态能量函数方法的应用 .....</b>	<b>187</b>
10.1	引言 .....	187
10.2	系统动态行为指标 .....	187
10.2.1	暂态能量裕度 .....	188
10.2.2	暂态电压下沉 .....	189
10.2.3	视在摇摆阻抗 .....	191

10.3 动态安全分析	192
10.4 紧急控制作用	199
10.4.1 切机(卸载)控制	199
10.4.2 切负荷控制	201
10.4.3 制动电阻控制	203
10.5 运行规划	203
10.6 系统规划	206
参考文献	209
附录一 Gear 方法简介	211
附录二 发电机磁场储能项的表达式	213



# 1 引 论

**提要:** 本章论述电力系统安全评定的内涵及其在系统运行与规划中的重要地位。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之中,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、对极限参数计算快速而著称,因而受到较多的关心,成为仿真方法的一种重要补充,而不是代替仿真方法。本章进一步论述了暂态能量函数方法所采用的数学模型:即经典电力系统模型、网络结构保持模型与网络降阶模型。最后介绍了暂态能量函数方法的现代主要文献。

## 1.1 电力系统安全评定<sup>[1,2]</sup>

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愈大,互联的部分愈多,其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),都有可能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。因此,国内外大型电力系统的运行与规划都把电力系统的安全评定(security assessment)置于重要地位。

70年代以来,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<sup>[2]</sup>,其中暂态稳定破坏事故占72.8%。为此,电网稳定的总结工作曾经积极地进行。研究我国电力系统运行稳定性的经验,归结为三个基本条件的实现:第一个基本条件是必须具备一个合理的电网结构;第二个条件是必须用快速继电保护和自动装置去防止不稳定;第三个条件是改善电力系统运行稳定性的管理。80年代以来,由于省网的互联我国已步入500kV区域电网阶段。全国形成东北、华北、华东、华中、西北、华南等六个统一管理的跨省电网。大区电网的装机容量已达15000~20000MW。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年这一阶段统计全国每年平均发生稳定破坏事故已降为6.09次<sup>[4,5]</sup>,其中暂态稳定破坏事故占95.7%。90年代以来,由于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。即将兴建的三峡工程,计划装机容量1768万千瓦,500kV交(直)流输电出线达到14至17回,从而进一步促进大区电网间的互联。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,如电磁环网、大型单环网、电源经单回线上网和电源经多级变压上网等情况的出现,在严重故障下易于造成系统脆弱。与发达国家在大致相同的装机容量密度(kW/km<sup>2</sup>)下,线路承载度(MW/km)远高于发达国家。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。在这些系统中涉及到既有暂态功角稳定问题又有电压稳定问题。处于极限条件下系统的成功运行,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。对于偶然事故,需要运用在线数据进行预分析。这就要求提供暂态稳定评定的快速方法作为能量管理系统(energy management system)应用软件的组成部分。这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和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。用暂态分析方法去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;对于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。倘评定表明某些不理想条件的出现可以导致对电力系统安全的一种威胁,则必须采取校正作用。因此随着“评定”涉及到“控制”,作为一种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不超过发热允许的定额。

(2) 母线电压处于规定的极限范围以内。

(3) 联络线端点电压间的夹角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。有三种动态安全问题:

(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,从而暂态稳定分析组成动态安全评定的主体。

运行中的系统需要检测在某些故障下造成系统脆弱、导致系统分离以及因事故扩大造成可能的严重后果,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应该避免事故扩大的措施等。而这种需求现时是远未能满足的。事实上我国的一些大区电网及省网在80年代已经成功地引进了现代控制中心的能量管理系统(EMS),已具备若干基础功能<sup>①</sup>,已为在线暂态稳定分析提供了良好的环境。而许多调度局的运行方式科则用动态分析去规划系统运行。

在系统规划方面对暂态稳定的研究需要对变化的系统条件进行大量计算:如网络结构的变化、不同的负载水平、不同的传输功率水平等。此外,故障参数也是变化的,如不同的故障型式、地点和持续时间。规划工程师需要一种可靠的快速的方法从上百种计算中选择需要研究的重要故障情况进行详细仿真,或者用于决定系统的极限运行条件(如最大功率传输水平),或者用于在适度成本下系统合理参数的研究等。

## 1.2 电力系统暂态稳定及其分析方法

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。倘能达到故

<sup>①</sup> 这些基础功能包括SCADA, AGC, NB, DB(HABITAT), SE, DPF及SSA等。

障后的稳态,它可以显著地不同于故障前的稳态,极端情况下它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。

倘所有联结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。倘系统中一台(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<sup>[19778]</sup>：“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方面是去避免失控的、广延的级联跳闸而引起的电力中断。如何能使一网架结构较弱的系统去达到这一目标?可以根据不同国情采用不同的方法。例如发达工业国家采用强化网络的方法;我国《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四种情形<sup>[1977]</sup>:

(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) 在故障下不导致损坏系统重要设备时,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的概率的不同而采取的分级安全稳定标准,对于一种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在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)表示一种不稳定的系统。通常同步机的转子角是相对于一同步旋转坐标而量度的。倘一台同步机组趋向于不稳定而失步,相对于其他机组的该机角速度将继续增加,这意味着该机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。倘经历暂态后系统是稳定的,

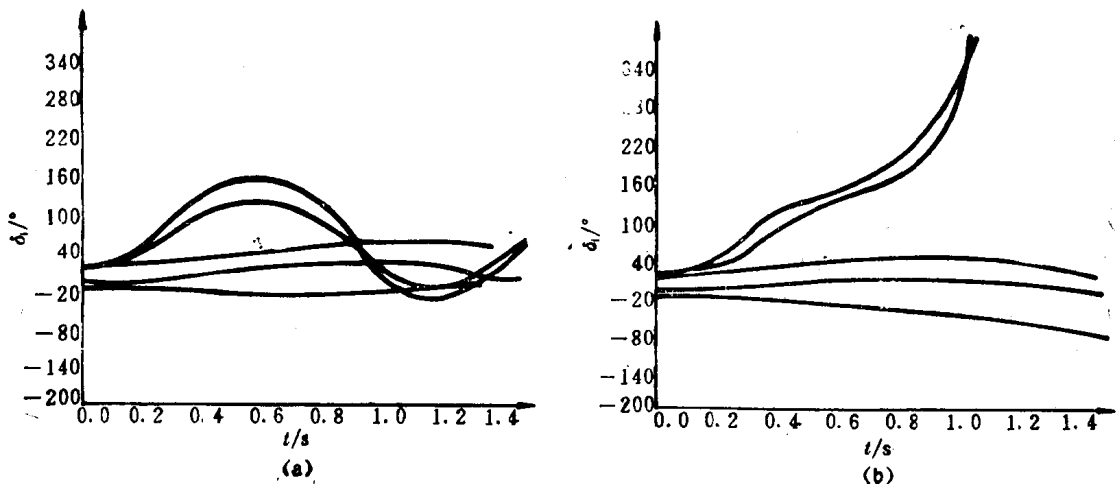


图1-1 发电机转子角度时间曲线

(a) 稳定情况; (b) 不稳定情况

它可以恢复到系统的原有频率或者稳定到一新的频率。前者称之为频率平衡 (frequency equilibria); 后者称之为同步平衡 (synchronism equilibria)。

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通常所说的暂态稳定分析 (transient stability analysis)。描写系统的数学模型是一组非线性微分方程

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

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

经受大扰动的电力系统实际上经历三种不同的阶段:

(1) 故障前系统

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

此时系统处于故障前的稳定平衡状态  $\boldsymbol{x}(0)$ , 称为  $\boldsymbol{x}^{\text{BF}}$ 。由解(1.2)而得到。

(2) 故障时系统

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

其初始条件为  $\boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}^{\text{BF}}$ 。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(1.3)而得到。实际上在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  $\boldsymbol{f}^{\text{F}}$ 。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

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

具有初始条件  $\boldsymbol{x}(t_c) = \boldsymbol{x}_c$ 。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(1.4)而得到。

系统的暂态稳定问题是: 倘系统(1.4)具有一稳定平衡状态  $\boldsymbol{x}^{\text{PF}}$ , 则从故障后的初始状态  $\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{x}_c$  开始, 事故后系统的轨线  $\boldsymbol{x}(t)$  随着  $t \rightarrow \infty$ , 将逐渐收敛到稳定平衡状态  $\boldsymbol{x}^{\text{PF}}$  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  $A(\boldsymbol{x}^{\text{PF}})$  以内?

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。在规模上已可包含几千条母线、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。如我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及西德的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, 正在开始研究。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 (transi

ent energy function method)<sup>[14,20,32]</sup>。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) 描述了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。这种暂态能量是由故障所激发，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，动能开始减低而位能继续增长。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，事故后系统所能达到的顶值位能是系统能够吸收的最大能量，这一顶值位能称之为临界能量 $V_{cr}$ 。

暂态能量函数方法就是通过在故障阶段的末了(故障清除时刻)的系统暂态能量 $V_{e1}$ 与临界能量相比较，直接评定系统的暂态稳定性。两者之差称之为能量裕度 (energy margin)，也就是稳定裕度(stability margin)，通常表示为

$$\Delta V = V_{cr} - V_{e1} \quad (1.5)$$

能量裕度不仅与系统的失步行为相关联，也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)<sup>[23]</sup>、失步继电器所看到的视在摇摆阻抗 (apparent swing impedance)<sup>[24]</sup>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仍然受到限制。目前在经典电力系统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EPRI的DIRECT<sup>[15,19,22]</sup>、巴西Catarina大学开发的IPEBS、英国帝国大学开发的IC-PEBS、比利时Liege大学及我国南京自动化研究所开发的EEAC等<sup>[16,17]</sup>。基于结构保持模型的直接法也已开发出来，如美国EPRI的DIRECT<sub>4.0</sub><sup>[34]</sup>。

两种方法的比较如表1.1所示。由该表可见，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<sup>[9,10,11]</sup>。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特有功能<sup>[15]</sup>，迄今暂态能量函数方法出现了如下的一些应用场合：

表1.1 时域仿真与直接法的比较

比较内容	时域仿真方法	直接方法
1. 求解方法	数值算法(Algorithm) 点式方法(point-wise method)	分析(analysis)方法 域式方法(Area-wise method)
2. 模型能力	详尽	尚不够详细
3. 提供信息	系统变量时间响应	系统稳定程度及其灵敏度
4. 快速性	计算量大, 耗费机时	极限参数计算速度快
5. 应用	工业上的主要方法	强化时域解, 在线或近实时应用, 预防控制

### 1. 在线动态安全分析<sup>[21]</sup>

- 1) 稳定分类及偶然事故筛选;
- 2) 用稳定裕度对系统关键参数的灵敏度方法导出运行极限;
- 3) 运用在线数据校核查表方式得出的离线结果。

### 2. 紧急控制中的应用

- 1) 失步检测系统<sup>[24]</sup>、失步保护系统<sup>[25]</sup>;
- 2) 切机、切负荷系统<sup>[26]</sup>;
- 3) 汽门快关系统;
- 4) 电制动系统。

### 3. 离线快速暂态稳定分析

- 1) 运行规划中对多种运行方式进行稳定评估、校验继电保护装置的整定时间及校正措施分析;
- 2) 系统规划中评价网架结构强弱,将稳定指标列入方案比较之中。

## 1.3 电力系统数学模型

暂态能量函数方法通常需要根据电力系统的原始数学模型构造能量函数。它所采用的系统模型通常有以下三种类型:①经典电力系统模型(classical power system model)<sup>[14,15]</sup>, ②网络结构保持模型(network structure preserving model)<sup>[27,28]</sup>和③网络降阶模型(network reduced order model)<sup>[16,29,30,31]</sup>。

电力系统经典模型中发电机用  $d$  轴暂态电抗后的恒定电势代表,负载用恒定阻抗表示以及将电力网络收缩到发电机内节点。系统方程通常表示为

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.6)$$

式中  $x$  为状态向量,  $f$  为非线性函数向量。

这类模型由于发电机和负载过于简化,网络收缩使失去网络拓扑,因而导致精度上的缺陷。但由于计算速度上的优势,对于大规模电力系统的暂态稳定分析仍有其用武之地。

为克服经典模型的缺陷,80年代初提出了结构保持模型<sup>[27,28]</sup>。在这类模型中,电力网络结构保持,负载可以计入静态特性或动态特性,发电机可以计入凸极效应、磁链衰减以及励磁控制作用,发电机采用一轴模型或双轴模型,也可采用Park方程模型。系统方程通常表示为一组微分代数方程:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y), \\ 0 &= g(x, y). \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中  $x$  为状态向量,  $y$  为代数向量,  $f, g$  为非线性函数向量。

根据这类模型构造出的暂态能量函数称为结构保持能量函数(structure preserving energy function)或称为拓扑能量函数(topological energy function)。应用这类模型不但可以研究暂态功角稳定问题,也可用它研究电压稳定问题。

第三类模型是网络降阶模型。电力系统是本质非线性的大系统(large scale system),为克服高维模型在求解和实施控制策略方面所面临的困难,可以运用分解集结方法(decomposition aggregation approach)。即将大系统分解为若干个低阶子系统。用这些低阶子系统去估计子系统的稳定域,从这些子系统获得的信息以及它们的互联性质出发,运用集结技术

去产生全系统的稳定域。这种分解可以是数学的或物理的。值得指出的是运用数学方法分解,临界能量计算结果往往保守;而用物理方法分解,常常能够得到较好的结果。电力系统运用降阶能量函数方法的代表性方法有扩展等面积定则(extended equal area criteria)<sup>[16][17]</sup>,单机或成组机组能量函数(individual machine or group machine energy function)方法<sup>[18]</sup>、割集能量函数(cutset energy function)<sup>[30]</sup>方法和时间尺度能量函数(time scale energy function)方法等<sup>[31]</sup>。

扩展等面积方法的基本概念是在一故障扰动下,假定电力系统的机组分为两群:一群包含临界机组以及另一群为其余机组。然后对两群分别用等值机进行两机动态等效,进而等值为单机无穷大母线系统,从而系统的暂态稳定可用面积定则进行评定。这需要考一些候选情况,并从这些候选的临界故障清除时间中选择最小的一个作为系统的临界稳定条件。该方法计算快速,但有赖于正确识别临界机群并按系统轨线动态修改单机无穷大母线系统的参数。

倘我们能够在线推断或事先知道(由离线分析结果)不稳定模式的信息,即在一定故障下,某一机组或某一群机组趋向于从系统的其余部分分离出来,那么就能实施一种降阶模型下的能量函数方法。例如可用单机能量函数或成组机组能量函数进行稳定分析。由于系统在故障下趋向于同调机群之间的振荡,因而也可将系统分为若干个割集,从而形成割集能量函数,用寻找最脆弱的割集方法决定全系统的稳定域。以上三种部分能量函数方法比之全系统能量函数方法能更为精确地决定系统的暂态稳定域,这是由于在故障模式既定的条件下,部分能量函数能更为精确地计算出造成系统分离的能量。

一类降阶分解方法是基于模态分解(modal-based decomposition)的时间尺度能量方法。用线性化系统的模态分解方法将系统分解为若干个同调区域。各个区域的偏离惯性中心变量代表慢变量,构成慢子系统变量;每个同调区域内部的机间变量代表快变量,构成快子系统变量。因此,慢能量与区域的惯性中心相联系,快能量与区域内机组间振荡相联系,而快—慢能量与快—慢变量相联系。由于在一给定的故障下,依赖于故障地点,仅有少数区域被扰动,因此可以用被扰动区域的快能量、全部慢能量和快—慢能量来近似全系统的能量,从而构成降阶模型下的全系统能量函数。

## 参 考 文 献

- [1] A. A. Fouad, C. L. DeMarco, M. A. Pai, R. Schlueter, Security Assessment, *Presented at NSF Workshop on University Research For Electric Power System Engineering*, Temple, Arizona, April 8~10, 1987
- [2] P. Kunder, E. G. Neudorf, P. Henry, J. Fish, J. Mitsche, Rapid Analysis of Transient Stability: Needs, Benefits and Requirements, *IEEE Publication*, No. 87TH0169-3-PWR, 1987, pp5~7
- [3] 电力生产司,“1970~1980年全国电网稳定破坏事故的分析:《全国电网稳定会议录》,1981
- [4] 电力生产司,1981~1987年全国电网稳定破坏事故的分析,《全国电网工作座谈会议录》,1988
- [5] 雷晓蒙、郭国川,“当前我国电网结构与稳定的主要问题”,《电网技术》,1993年,第2期
- [6] 水电部,《电力系统安全稳定导则》,水利电力出版社:1981
- [7] 水电部,《电力系统安全稳定导则编制说明》,水利电力出版社,1987
- [8] 水电部,《电力系统技术导则》,水利电力出版社,1985
- [9] A. Bose, Application of Direct Methods to Transient Stability Analysis of Power Systems, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, No. 7, July, 1934
- [10] CIGRE Task Force, *Assessment of Practical Fast Transient stability Methods*, 88.02.09,

April 1991, pp1~18

- [11] CIGRE TF, Report Summary, *Assessment of Practical Fast Transient Stability Methods*, 38.02.09, Sept. 1993
- [12] T. Athay, R. Podmore and S. Virmani, A Practical Method for the Direct Analysis of Transient stability, *IEEE Trans*, Vol. PAS-98, No.2, March/April 1979, pp 573~584
- [13] N.Kakimoto and M.Hayashi, Application of Lyapunov Direct Method for the transient stability analysis of multimachine power system, *IEEE Trans. on CDC MP*, 1981
- [14] M.A.Pai, *Power System Stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov*, North Holland Publishing Co., New York, 1981
- [15] A.A. Fouad and V.Vittal, The Transient Energy Eunction Method, *EP&ES*, Vol. 10. No.4, Oct., 1988, pp.233~246
- [16] Y.Xue., T. Van Cutsem and M.Ribbens Pavella, A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of large Power Systems, *IEEE Trans on Power Systems*, Vol. 3, No.2, May, 1988
- [17] Y. Xue, M. Pavella, Critical-cluster identification in transient stability studies, *IEE Proceedings-C*, Vol, 140, No.6, Nov., 1993
- [18] M.A.Pai, *Energy Function Analysis For Power System stability*, Kluwer Academic Publishers, 1989
- [19] H.D. Chiang, F.F.Wu and P.P.Varaiya, A BCU Method for Direct Analysis of System Transient Stability, *IEEE/PES*, Summer Meeting 1991
- [20] H.D.Chiang, Analytical Results on Direct Methods for Power System Transient Stability Analysis, *Advances in Control and Dynamic Systems, XL Theme: Advances in Electric Power and Energy Conversion Systems, Dynamics and Control*, Academic Press. Vol. 43, Part 3, 1991, pp.275~334
- [21] F.A. Rahimi, M.G. Lauby, J.N.Wrubel, K.L Lee, Evaluation of the Transient Energy Function Method for On-line Dynamic Security Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.8, No.2, May, 1993
- [22] G.A.Maria, C.Tang, J.Kim, Hybrid Transient Stability Analysis, *IEEE Trans. on Power System*. Vol.5, No.2, May, 1990
- [23] Atif Debs, Voltage dip at maximum angular swing in the context of direct stability analysis, *IEEE Trans on Power Systems*, Vol. 5, No.4, Nov., 1990
- [24] A.A.Fouad, V.Vittal, T.Oh and J.G. Raine, Investigation of Loss of Generation Disturbances in the Florida Power & Light Co.Network by the Transient Energy Function Method, *IEEE Trans on Power Systems*, PWR5-1, No.3, Aug, 1986
- [25] W.R.Roemish and E.T. Wall, A New Synchronous Generator Out-Of-Step Relay Scheme, Part I and Part II, *IEEE Trans*. Vol. PAS-104, March 1985
- [26] Y.Ohura, K.Matsuzawa, H.Ohtsuka et al. Development of A Generator Tripping System for Transient Stability Augmentation Based on The Energy Function Method, *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, No.3 July, 1986
- [27] A.R. Bergen and D.J. Hill, A Structure Preserving Model for Power System Stability Analysis, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 100, Jan. 1981, pp 25~35
- [28] N. Tsolas, A. Arapostathis and P.P. Varaiya, A Structure Preserving Energy Function for Power System Transient Stability Analysis, *IEEE Trans. on CAS*, Vol.32, Oct., 1985, pp.1041~1049
- [29] A. N. Michel, A. A. Fouad and V. Vittal, Power System Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions, *IEEE Trans. on CAS*, Vol. 30 No. 5, May 1983, pp.266~276
- [30] K. S. Chandrashekhar and D. J. Hill, Cutset stability Criterion for Power Systems Using A Structure Preserving Model, *EP & ES*, Vol 8, No.3, July, 1986, pp. 146~157
- [31] K. Khorasani, M. A. Pai, P.W. Sauer, Modal-Based Stability Analysis of Power Systems Using Energy Functions, *EP&ES* Vol.8, No.1. Jan., 1986, pp.11~16.



- [32] A.A.Fouad and V.Vittal, *Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method*, Prentice Hall, 1991
- [33] 刘笙, "电力系统暂态稳定分析的能量函数方法", <电网技术>:第 19 卷,第 2 期, 1995年 2 月,第11~17页。
- [34] H.D. Chiang, C.C.Chu and G.Caulay, *Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Functions: Theory, Applications, and Perspective*, *Proceedings of The IEEE*, Vol. 83, No.11, Nov., 1995, pp.1497~1529