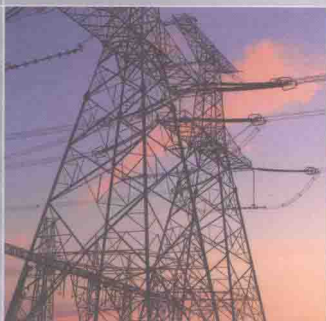




电力系统广域稳定控制

马 静 王增平 著



科学出版社

电力系统广域稳定控制

马 静 王增平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍复杂电力系统背景下广域信息监测、广域稳定分析和广域稳定控制的最新研究成果。全书共7章,第1、2章主要介绍电力系统安全防御基本理论和电力系统分析与控制理论方面的基础知识;第3章从广域信号优选方案和广域控制器优选两方面介绍电力系统广域信息监测;第4、5章分别基于随机和时滞两个稳定分析过程中的关键问题系统介绍广域稳定分析理论;第6、7章分别介绍广域鲁棒控制和广域自适应控制。

本书可供高等院校电气工程专业的师生及科研技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统广域稳定控制/马静,王增平著. —北京:科学出版社,2015. 10
ISBN 978-7-03-045341-9

I. ①电… II. ①马…②王… III. ①电力系统-自动控制 IV. ①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 187500 号

责任编辑:孙 芳 孙伯元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年10月第一次印刷 印张:18

字数:350 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电力系统运行的稳定性问题是贯穿我国电力系统安全防御“三道防线”始终的核心问题,众多电力科研人员都对其孜孜以求,不断探索。随着新能源电力的大规模接入及电力电子设备的大范围应用,电网互联引发的稳定问题日益突出,严重威胁着电力系统的安全稳定运行,甚至造成了多起大停电事故,给社会和经济带来难以估量的损失。新环境和新形式下的电网稳定性问题值得所有电力从业人员深入思考和探索。

挑战往往伴随着创新和机遇。随着 PMU 技术的出现与广泛采用,来自 WAMS 系统的广域信息为复杂大电网的稳定分析和控制提供了丰富的同步动态信息,将其与稳定控制有机结合,最大程度地保障电网安全运行,是当今智能电网领域一项具有重大理论价值和现实意义的课题。目前,广域稳定控制尚有不少问题亟待解决。在强时变、强时滞、强不确定的复杂电网环境下,如何展开系统稳定性判别、失稳模式辨识及稳定域求解等,是广域稳定控制实现的基础和前提。同时,如何设计合理有效的鲁棒和自适应控制策略以解决电网欠控、过控及失控问题,是广域稳定控制的目标和任务。本书在总结现有研究成果的基础上,充分吸收传统稳定控制的经验教训,以作者的研究成果为主体,在一定广度和深度上对广域稳定控制的关键技术问题(如广域信号监测、广域稳定分析和广域控制策略等)进行了前瞻性的探讨,试图为广域稳定控制指明演进方向。

本书力求基础理论部分深入浅出,公式推导严谨完整,在此基础上,通过大量的案例分析,对书中所介绍的广域稳定控制相关方案进行了严密且贴合工程实际的验证。需要注意的是,由于广域稳定控制方兴未艾,书中所论述的内容未必是最终的解决方案,对于目前尚未统一认识的问题,作者在书中提出了鲜明的观点,真诚期待本书能起到抛砖引玉的效果,读者可在本书的启发引导下做出更为优秀的研究成果。由于篇幅所限,无法详细介绍的问题列出参考文献供读者深入探讨研究时参考。

在本书撰写过程中,国家自然科学基金项目(51277193、50907021)、国家 973 项目(2012CB215200)、霍英东教育基金(141057)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014ZZD02)、北京市科技新星支持计划(Z141101001814012)、北京市优秀人才支持计划(2013B009005000001)给予了大力支持。同时,还要感谢美国

弗吉尼亚理工大学 James S. Thorp 院士的悉心指导和无私帮助,以及稳定控制课题组的王彤、王上行、郭锐、彭明法、王玉慧、王雪、李俊臣、高翔、朱祥胜、李益楠、邱扬等同学的辛勤付出。作者在此表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,望广大读者不吝赐教。

马 静

2015 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 电力系统安全防御基本理论	1
1.1 概述	1
1.2 电力系统可靠性和稳定性	2
1.2.1 电力系统可靠性	2
1.2.2 电力系统稳定性	4
1.3 电力系统三道防线	7
1.3.1 电力系统扰动的分类	7
1.3.2 电力系统运行状态	8
1.3.3 电力系统稳定控制的三道防线	9
1.3.4 防御系统性能特点	12
1.4 小结	16
第 2 章 电力系统分析和控制理论简介	17
2.1 概述	17
2.2 电力系统数学模型简述	17
2.2.1 同步电机数学模型	17
2.2.2 励磁系统数学模型	21
2.2.3 原动机与调速器数学模型	23
2.2.4 负荷数学模型	26
2.3 电力系统稳定性分析方法简述	27
2.3.1 时域仿真法	27
2.3.2 特征根分析法	29
2.3.3 暂态能量函数法	30
2.4 自动控制理论简述	31
2.4.1 经典控制理论	31
2.4.2 现代控制理论	32
2.4.3 大系统理论和智能控制理论	33
2.5 小结	35
第 3 章 广域信息监测	36
3.1 概述	36

3.2	测试系统介绍	36
3.2.1	4 机两区系统	36
3.2.2	16 机系统	37
3.2.3	WECC 系统	37
3.3	广域信号优选方案	38
3.4	广域控制器优选方案	51
3.5	小结	59
第 4 章	随机系统稳定分析	61
4.1	概述	61
4.2	参数随机系统稳定分析	61
4.2.1	基于区间模型和二阶摄动理论的低频振荡模态分析方法	61
4.2.2	基于多参数二阶摄动灵敏度的电力系统低频振荡模态分析方法	69
4.2.3	基于保护映射理论的电力系统小扰动稳定域计算方法	81
4.3	结构随机系统稳定分析	92
4.3.1	基于时变状态矩阵的故障系统稳定性分析	92
4.3.2	考虑连锁故障的多工况电力系统功角稳定性分析	98
4.4	激励随机系统稳定分析	108
4.5	小结	119
第 5 章	时滞系统稳定分析	121
5.1	概述	121
5.2	非跳变时滞系统稳定性分析	121
5.2.1	基于伊藤微分的时滞电力系统随机稳定性分析	121
5.2.2	考虑风电并网的电力系统随机时滞稳定性分析	132
5.3	跳变时滞系统稳定性分析	145
5.3.1	基于离散 Markov 理论的跳变电力系统时滞稳定性分析	145
5.3.2	基于事故链和 Markov 过程的时滞电力系统稳定性分析	154
5.4	小结	163
第 6 章	广域鲁棒控制	164
6.1	概述	164
6.2	内部不确定性鲁棒控制	164
6.2.1	基于摄动矩阵和凸多胞体的不确定性鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法研究	164
6.2.2	基于多面体不确定性和降低保守性的鲁棒 H_2/H_∞ 控制策略研究	173
6.2.3	基于积分滑模控制的广域阻尼鲁棒控制策略	178
6.3	最优鲁棒控制	184
6.3.1	基于非凸稳定区域的广域阻尼鲁棒控制策略研究	184

6.3.2 基于完全调节法的广域阻尼鲁棒 H_2/H_∞ 控制策略研究	193
6.4 误差跟踪鲁棒控制	198
6.5 小结	204
第7章 广域自适应控制	205
7.1 概述	205
7.2 考虑工况辨识的自适应控制	205
7.2.1 基于联邦 Kalman 滤波的区间振荡自适应控制策略	205
7.2.2 基于 CART 的自适应控制策略	220
7.3 考虑控制器切换的自适应控制	234
7.3.1 基于双重 Youla 参数化的自适应控制器切换	234
7.3.2 基于连续 Markov 模型的自适应控制器切换	246
7.3.3 基于离散 Markov 模型的自适应控制器切换	260
7.3.4 考虑时滞特性的自适应控制器切换	268
7.4 小结	276
参考文献	277

第 1 章 电力系统安全防御基本理论

1.1 概 述

电力系统是一个分布地域较广、元件众多、动态响应速度快的大规模系统,某一元件的扰动可能很快波及全系统;其也是一个复杂的非线性动力系统,在运行过程中经常可能受到各种自然及人为的扰动。分析电力系统在不同等级扰动下的暂态和动态行为,确定合适的控制策略及相应的措施,是电力系统设计与运行最为重要的任务。

从 20 世纪 60 年代起,大面积停电事故就时有发生,并且造成了巨大的经济损失。随着电力系统规模的不断扩大,电力系统结构的日趋复杂,电力系统安全问题仍然没有得到彻底解决。2003 年,北美东部电网“8·14”大停电引发了世界范围内对防止大电网大面积停电的研究热潮;2012 年,印度大停电则引发了有史以来规模最大的停电事故。大规模新能源电力的接入,造成电网运行方式多变,分布式电源、微网接入及自愈控制造成配电网运行方式多变甚至发生形态的变化,电力电子设备的应用使电网含有大量的非线性受控元件,电网稳定运行和控制的难度日益增大。因此,研究大电网的安全防御已成为当务之急。

我国的电力系统工作人员为保证系统的安全稳定运行做了大量工作,并提出了应用于防御严重故障的电力系统“三道防线”。第一道防线能保证系统在正常运行情况下有一定的安全裕度,保证在不严重故障下不损失电源负荷并保持系统稳定运行;第二道防线能保证在较为严重的故障下系统不致发生稳定破坏和事故扩大;第三道防线保证在极端严重故障的情况下,保证不发生系统崩溃和大面积停电。

本章是对电力系统安全防御基本理论的综述,首先概述对电力系统可靠性的基本要求,以及国际和我国对电力系统各种稳定性的定义与分类,然后介绍电力系统可能承受的各种扰动及其对系统的影响。为保证系统的安全稳定运行,需要根据扰动的情况,采取各种保护和控制措施,包括预防性控制、紧急控制、解列控制和恢复控制。

1.2 电力系统可靠性和稳定性

1.2.1 电力系统可靠性

电力系统的基本功能是向全部用户不间断地供应质量(电压和频率)合乎规定的电能。电力系统可靠性是按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力用户提供电力和电量的能力的量度,包括系统充裕性和安全性两个方面^[1]。

1. 充裕性

充裕性(也称静态可靠性)是指电力系统稳态运行时,在系统元件额定容量、母线电压和系统频率等的允许范围内,考虑系统中元件的计划停运及合理的非计划停运条件下,向用户提供全部所需的电力和电量的能力^[1]。

充裕性要求在较长时间尺度内进行考核,表征充裕性的具体指标包括给定时间区间内系统不能满足负荷要求的概率、频率、时间或是造成负荷需求电力或电量等。

(1) 缺电概率(loss of load probability, LOLP)。指系统在给定时间区间内不能满足负荷需求的概率,即

$$\text{LOLP} = \sum_{i \in S} P_i \quad (1.1)$$

式中, P_i 为系统处于状态 i 的概率; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集。

(2) 缺电时间期望(loss of load expectation, LOLE)。指系统在给定时间区间内不能满足负荷需求的小时或者天数的期望值,即

$$\text{LOLE} = \sum_{i \in S} P_i T \quad (1.2)$$

式中, P_i 为系统处于状态 i 的概率; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集; T 为给定时间区间的小时数或天数。

(3) 缺电频率(loss of load frequency, LOLF)。指系统在给定时间区间内不能满足负荷需求的次数,即

$$\text{LOLF} = \sum_{i \in S} F_i \quad (1.3)$$

式中, F_i 为系统处于状态 i 的概率; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集。

(4) 缺电持续时间(loss of load duration, LOLD)。指系统在给定时间区间内不能满足负荷需求的平均持续时间,即

$$\text{LOLD} = \frac{\text{LOLE}}{\text{LOLF}} \quad (1.4)$$

式中, LOLE 为缺电时间期望; LOLF 为缺电频率。

(5) 期望缺供电力(expected demand not supplied, EDNS)。指系统在在给定时间区间内因发电容量短缺或电网约束造成负荷需求电力削减的期望数, 即

$$\text{EDNS} = \sum_{i \in S} C_i P_i \quad (1.5)$$

式中, P_i 为系统处于状态 i 的概率; C_i 为状态 i 条件下削减的负荷功率; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集。

(6) 期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS)。指系统在给定时间区间内因发电容量短缺或电网约束造成负荷需求电量削减的期望数, 即

$$\text{EENS} = \sum_{i \in S} C_i F_i D_i = \sum_{i \in S} C_i P_i T \quad (1.6)$$

式中, P_i 为系统处于状态 i 的概率; F_i 为系统处于状态 i 的概率; D_i 为状态 i 的持续天数; C_i 为状态 i 条件下削减的负荷功率; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集; T 为给定的时间区间的小时数。

2. 安全性

安全性(也称动态可靠性)是指电力系统在运行中承受如短路或系统中元件意外退出运行等突然扰动的能力。电力系统能承受住故障扰动引起的暂态过程并过渡到一个可接受的运行工况, 不发生稳定破坏、系统崩溃或连锁反应; 另外, 在新的运行工况下, 各种运行条件得到满足, 设备不过负荷, 母线电压、系统频率在允许范围内^[1]。

电力系统安全运行应满足以下约束条件:

(1) 负荷约束。一个包括 n 个节点的系统应具有以下功率平衡方程, 即负荷约束条件:

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1.7)$$

式中, θ_i, θ_j 分别为节点 i, j 的电压相角; U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压幅值; P_i, Q_i 分别为节点 i 的有功和无功注入功率; G_{ij}, B_{ij} 为节点导纳矩阵的相应元素。

(2) 运行约束。节点电压幅值 U 、相角差 θ 、各条支路潮流 S 及发电机组功率 P, Q 应在一定的范围内:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i^l \leq U_i \leq U_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ |\theta_{ij}| \leq \theta_{i,j}^m, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \\ |S_{ij}| \leq S_{i,j}^m, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \\ P_i^l \leq P_i \leq P_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i^l \leq Q_i \leq Q_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (1.8)$$

式中, 左上角标 l、u、m 分别表示下限、上限和最大值。

运行约束条件属于不等式约束, 也可综合写成

$$U^l \leq U \leq U^u \quad (1.9)$$

式中, U 表示状态变量的列向量。

1.2.2 电力系统稳定性

现代电力系统是一个巨大而复杂的动态系统, 安全稳定是电力系统运行的基本要求。模型的高维特性、运行方式的不确定性、原件的强非线性、扰动的随机性, 都使得电力系统稳定现象和机理十分复杂。随着大规模电网互联, 高压直流输电 (HVDC)、灵活交流输电系统 (FACTS) 等柔性输电技术的广泛应用, 以及新能源接入的比例逐渐提高, 对电力系统动态机理的分析和稳定性分析与控制越来越困难。

电力系统稳定可以概括为系统在给定初始条件下维持平衡状态或者受到扰动后恢复到可容许平衡状态的一种能力。

通过对稳定性分类及定义, 可以对电力系统稳定性有一个概括性的理解, 掌握各种形式的稳定性特征、产生的原因及它们之间的关系。20 世纪 60 年代之前, 习惯将电力系统稳定性分成静态稳定和动态稳定^[2]。

(1) 静态稳定性 (steady-state stability)。主要指系统受到小扰动后, 保持所有正常参数接近正常值的能力。

(2) 动态稳定性 (dynamic stability)。指系统受到大的扰动后, 运行参数恢复到正常值的能力。

IEEE 为澄清在电力系统稳定性分类上的混乱, 由电力系统动态过程及行为分会组成一个工作小组, 于 1981 年在 IEEE 电力工程分会的冬季会议上提出关于电力系统稳定性新的分类和定义:

(1) 静态稳定/小扰动稳定。对于某个稳态运行状态, 如果说系统静态稳定, 则当受到小的扰动后, 系统会达到与受扰动前相同或接近的运行状态。

(2) 暂态稳定/大扰动稳定。对于某个稳态运行状态及某种扰动, 如果说系统暂态稳定, 则当遭受到这个扰动后, 系统可达到一个可接受的稳态运行状态。

2004 年 8 月, IEEE 发表了 CIGRE 第 38 委员会与 IEEE 动态行为委员会联合小组制定的最新的电力系统稳定性的定义及分类。制定最新的稳定性分类法

的推动力在于:电力系统的规模由于区域性系统的互联而不断扩大,以及新的控制、保护技术的应用改变了系统的特性。此外,经济效益的提高使得送电稳定裕度减小,这些因素使新的形势下稳定性问题更加突出了,最明显的就是区域间因低频振荡出现的不稳定、电压不稳定及频率不稳定的现象日渐增多,这已由实际电力系统发生的多次大停电事故所证实。在1981年的分类法中,低频振荡的不稳定已明确包含在小扰动稳定性中,电压稳定性及频率稳定性可以说是隐含在小扰动及大扰动稳定性定义中。因此,新的分类法根据系统失去稳定的特征在三个运行变量上的表现,分为功角、电压、频率三种不同形式的稳定性,而每一种稳定性又分为小扰动稳定性及大扰动稳定性,并且建立了短期稳定性及长期稳定性与上述各种形式稳定性之间的联系。电力系统稳定性分类如图1.1所示。

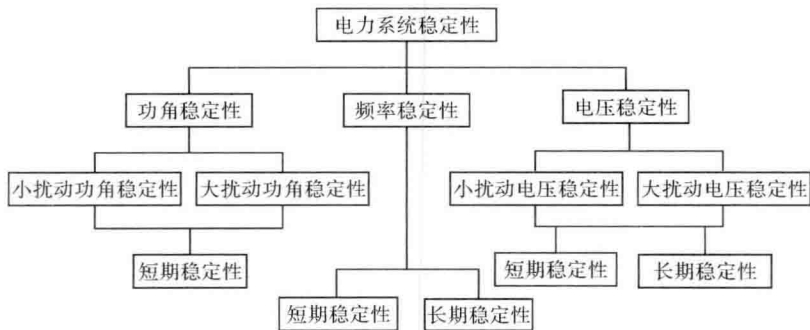


图 1.1 IEEE/CIGRE 的电力系统稳定性分类

根据扰动大小、导致不稳定模式的物理性质、流程及时间跨度等因素,IEEE/CIGRE 将电力系统稳定性分为功角稳定性、频率稳定性及电压稳定性^[3~6]。

(1) 功角稳定性。指互联系统中的同步发电机在遭到扰动后,保持同步运行的能力,其取决于每个同步发电机的电磁转矩和机械力矩保持/恢复平衡的能力^[7]。同步发电机的电磁力矩可以分解为两个分量:与转子角度差同相位的同步力矩分量和与速度差同相位的阻尼力矩分量。功角失稳包含爬行失稳和振荡失稳两种情况,分别对应同步能力不足和阻尼能力不足两种原因。

小扰动功角稳定性指电力系统在小扰动下保持同步的能力,由系统初始运行状态决定。小扰动问题通常与振荡阻尼不足有关。局部问题通常只涉及个别机组与系统其他部分的转子角振荡,这种振荡稳定性取决于输电系统的强度、励磁控制系统和电厂输出。全局问题由大型发电机集群间相互作用而产生,涉及一个地区机群与另一个地区机群间的振荡,存在于局部振动有明显区别的复杂特性。小扰动功角稳定性的时间尺度大约为扰动后的10~20s,因此可认为是短期现象。

大扰动功角稳定性或暂态稳定性通常指电力系统遭到严重扰动(如输电线路

短路)后保持同步的能力,其取决于系统的初始状态和扰动的严重性。失稳通常是由于同步力矩不足而形成的非周期性角度分离形式,表现为第一摆失稳。然而,在大系统中,暂态不稳定不经常表现为第一摆失稳形式,还可能与振荡模式相重叠,通常为几个振荡周期后失稳。研究暂态稳定性的时间尺度约为扰动后 3~5s,存在区间振荡的大互联系统可能为 10~20s,因此可以认为是短期现象。

(2) 电压稳定性。指电力系统在一个给定的初始状态承受扰动后保持系统中所有母线静态电压的能力,其取决于保持/恢复系统负荷需求和负荷供应两者之间平衡的能力。电压不稳定的形式是某些母线电压持续下降或上升,后果可能是损失一个地区的负荷,或者由于保护跳闸导致连锁反应而停运。

电压稳定性也可以分为大扰动电压稳定性和小扰动电压稳定性,分别描述了系统在大扰动(如系统故障、损失发电机或线路)或小扰动(如负荷的少量变化)保持静态电压的能力。稳定形式受系统和负荷特性、离散及连续控制和保护的相互作用影响。分析大扰动电压稳定性时须考虑系统的非线性特性,分析小扰动电压稳定性时可在某些时刻将系统参数线性化,但不能计及如分接头的非线性效应。电压稳定性分析的时间尺度可能从几秒到几十分钟,故而可能是短期或长期现象。

(3) 频率稳定性。指系统在严重扰动(如发电机跳闸、系统解列、失去大负荷等)导致有功功率不平衡后,通过调节系统的热备用出力或自动切除部分负荷,维持全系统或解列后各子系统的频率不超出允许范围的能力,其不稳定形式为频率持续下降或持续摆动引起发电机组或负荷的保护装置跳闸。

互联电网因故障解列后容易造成发电机和负荷功率的严重不平衡,从而导致频率发生大幅度偏移。系统严重故障而形成连锁反应跳闸时,造成不可控的无序解列,可能导致频率大幅度波动。频率的偏移过程和装置的作用特性的时间尺度可能从几分之一秒(如低频切负荷、发电机控制及保护装置响应时间)至若干分钟(如原动机调速器、负荷电压调节器的响应时间)。因此,频率稳定性可能是短期现象,也可能是长期现象。

与此同时,我国电力工作者根据长期设计、运行的时间和研究经验,提出了适于我国电网实际的电力系统稳定性的定义及分类,如图 1.2 所示。

以上两种定义和分类的总体框架和主要概念基本一致,两者的比较如表 1.1 所示,其主要区别在于: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外,还给出了大扰动动态稳定的定义(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过程和长期过程,但《电力系统安全稳定导则》(DL 755—2001)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。

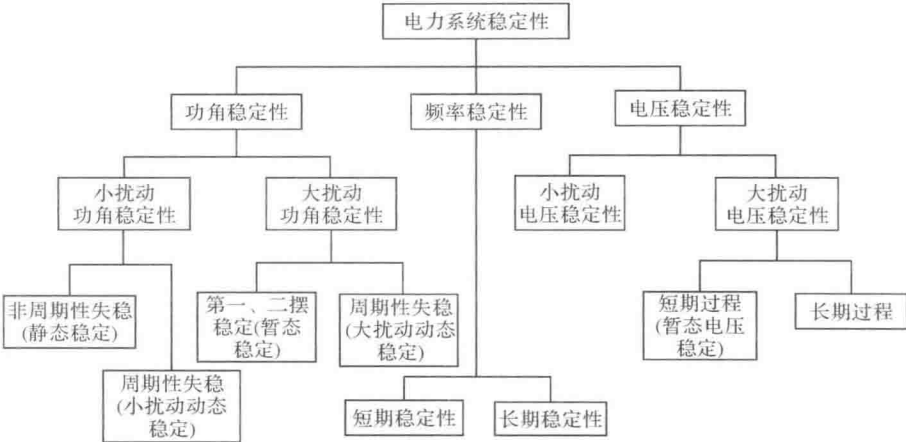


图 1.2 电力系统稳定性分类

表 1.1 两种稳定性分类比较

分类	IEEE/CIGRE		DL 755—2001	
功角稳定	小扰动 功角稳定	短期过程	静态稳定 小扰动动态稳定	
	大扰动 功角稳定	短期过程	暂态稳定 大扰动动态稳定	第一、二摇摆过程 短、长期过程
电压稳定	小扰动 电压稳定	短、长期过程	静态电压稳定	
	大扰动 电压稳定	短、长期过程	大扰动电压稳定	短、长期过程
频率稳定	短、长期过程		短、长期过程	

1.3 电力系统三道防线

1.3.1 电力系统扰动的分类

《电力系统安全稳定导则》(DL 755—2001)将大扰动按严重程度分为三类^[8]，并提出相应的安全稳定要求。

1. 第Ⅰ类大扰动——单一元件故障扰动

(1) 任何线路单相瞬时接地故障并重合成功。

(2) 同级电压的双回或多回线和环网,任一回线单相永久故障重合不成功及无故障三相断开不重合。

(3) 同级电压的双回或多回线和环网,任一回线三相故障断开不重合。

(4) 任一发电机跳闸或失磁。

(5) 受端系统任一台变压器故障退出运行。

(6) 任一大负荷突然变化。

(7) 任一交流联络线故障或无故障断开不重合。

(8) 直流输电线路单极故障。

2. 第Ⅱ类大扰动——较严重的单一元件故障扰动

(1) 单回线单相永久故障重合不成功及无故障三相断开不重合。

(2) 同杆并架双回线的异名两相同时发生单相接地故障重合不成功,双回线三相同时跳开。

(3) 直流输电线路双极故障。

(4) 任一段母线故障。

3. 第Ⅲ类大扰动——多重严重故障扰动

(1) 故障时开关拒动。

(2) 故障时继电保护、自动装置误动或拒动。

(3) 自动调节装置失灵。

(4) 多重故障。

(5) 失去大容量发电厂。

(6) 其他偶然因素。

1.3.2 电力系统运行状态

电力系统是一个具有结构、参数和动态不确定性的非线性动态系统,其运行条件一般可用三组方程式描述:一组微分方程式用来描述电力系统元件及其控制设备的动态行为;另两组代数方程式则分别构成电力系统运行的等式和不等式约束条件。等式约束表示系统总的发电量和总负荷量的平衡;不等式约束表示某些系统变量(如电压和电流)不得超过物理设备的最大极限。根据这些约束条件是否满足,系统运行分为如图 1.3 所示的 5 个状态^[9]。

电力系统的运行状态可以分成正常状态和异常状态两种情况。正常状态又可分为安全状态和警戒状态;异常状态又分为紧急状态和恢复状态。电力系统的运行情况包括了所有这些状态及其相互转移。

(1) 安全状态。指系统的频率、各节点的电压、各元件的负荷均处于规定的允

