

肖世杰 主编

# 电网安全稳定控制 应用技术



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

肖世杰 主编

# 电网安全稳定控制 应用技术

常州大学图书馆  
藏书章



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书由国网电力科学研究院电网稳定控制技术研究院/电网稳定控制技术分公司组织编写,旨在反映现代电网安全稳定运行和控制技术的不断发展变化,系统、全面地介绍电网安全稳定控制技术的基本理论和电力系统安全稳定控制技术的最新进展。

全书共十二章,主要包括电力系统安全稳定性的现象与本质,安全稳定控制概述,安全稳定控制机理及方法,频率、电压异常及其控制,异步运行状态及其控制等内容;同时对安全稳定控制装置集中管理系统,典型安全稳定控制工程,安全稳定控制装置的检验及运行维护,IEC 61850 环境下的安全稳定控制技术,新能源安全稳定控制技术,安全稳定控制新技术也进行了阐述,并对安全稳定控制技术的发展进行了展望。

本书理论与实践相结合,适用于电力系统安全稳定控制领域的工程技术人员、科研人员和电力系统规划人员以及电力专业研究生。

## 图书在版编目(CIP)数据

电网安全稳定控制应用技术 / 肖世杰主编. —北京: 中国电力出版社, 2011.12

ISBN 978-7-5123-2448-0

I. ①电… II. ①肖… III. ①电力系统—稳定控制  
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 258190 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 18.5 印张 301 千字

印数 0001—3000 册 定价 60.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 序

电力系统的安全稳定运行关系到国计民生和国家安全。当前，随着我国互联电网规模和范围的扩大，区域电网之间的电气联系和电网特性日趋复杂；电力市场的不断发展使电网运行方式变化多样，难以按照离线分析来判断安全稳定性。相继事件导致互联电网失去安全稳定性的风险也大大增加。在现代电力系统中，尽管稳定破坏事故不会频繁发生，但是一旦发生，其后果将会非常严重。对此，世界各国均不乏惨痛教训，并引起相关部门的高度关注。

电力系统稳定分析和控制的工程实践一直是理论和技术创新的土壤。在电力系统稳定技术领域，无论是理论研究和技术开发，还是产品生产和工程应用，都已经取得了长足的发展。尤其是原创性理论带动了一系列先进适用的稳定技术的发展和新型装备的应用。目前，电力系统安全稳定分析技术，以及针对电力系统稳定第二道防线和第三道防线的稳定控制装置，在全国各大电网已得到广泛的应用，为电网的安全稳定经济运行发挥了重要作用。为进一步提高大电网的安全稳定运行水平，更好地支撑可再生能源发电的入网和需求侧管理，各大电网都正在构筑以现代电力系统稳定分析与控制技术、信息技术和计算机技术为基础的电力系统安全防御体系，这些创新必将推进电网运行和控制方面新的质的飞跃。

随着电力系统安全稳定分析技术以及针对电力系统稳定第二道防线和第三道防线的稳定控制装置在全国各大电网的广泛应用，为提高从事电网安全稳定规划人员以及系统运行管理人员的专业水平和业务能力，适应电力系统安全稳定运行发展的需要，国网电力科学研究院电网稳定控制技术研究/电网安全稳定控制技术分公司组织有关专家编写了本书。本书内容系统全面，既包括电力系统安全稳定的基本理论，又对实际工程应用做了详细介绍，并密切关注当前安全稳定控制技术所面临的新环境、新技术。如新能源、交直流混联电网等方面的安全稳定控制技术问题。本书注重理论与实践相结合，对当前安全稳定控制技术面临的新环

境、新技术进行了全新的阐述。编写人员包括科研机构、企业和运行单位的教授、专家与生产一线的技术人员，很好地反映了我国电网安全稳定控制的技术水平。相信本书的出版，对培养我国电网安全稳定控制技术人才会起到十分积极的作用，并且大大提高运行部门驾驭电网稳定控制的能力，从而提高电力系统安全稳定运行水平。

希望本书能成为电网安全稳定控制技术、电力系统规划人员以及系统运行管理人员培训的好教材，并成为广大读者案头的必备图书，为建设、管理和运行我国坚强智能电网发挥更大的作用。

中国工程院院士

薛禹胜

2011年10月18日

## 前 言

我国电网正在发展成为世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远、技术含量最丰富、运行特性最复杂的电网。稳定控制技术是提高大电网安全稳定运行水平的基础性、关键性技术，是保障电网安全经济运行的重要手段。随着新能源的迅猛发展、集中接入和跨区消纳，电网运行控制的难度进一步加大。世界上多次大停电事故的发生表明，现代电力系统的可靠性面临着新的挑战，同时也证明了先进可靠的稳定控制技术的重要性。

本书的编者们深感任务艰巨、责任重大，并清醒地认识到，在做好稳定控制技术科研、开发和工程应用的同时，有必要结合最新的应用实践，将最新的稳定控制技术的思路、方法和经验，系统地、及时地奉献给广大同行们，以期共同为我国电网安全稳定运行做出贡献。编者凭借扎实的理论基础和丰富的实践经验，承担了全国电网几乎所有的重大安全稳定控制工程。从川电东送工程、三峡电力送出工程，到 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程、向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程、西北—华中±500kV 直流联网工程、宁东—山东±660kV 直流输电示范工程、上海世博会保电工程、西北—新疆 750kV 联网工程、青藏±400kV 直流联网工程等，都充分见证了编者们在安全稳定控制技术研究和应用中的雄厚实力；从几十套广域监测分析保护控制系统，到国内首套大型集群风电智能控制系统的成功研发并投入运行，都彰显了编者们为确保我国稳定控制技术的世界领先地位所进行的创新实践。

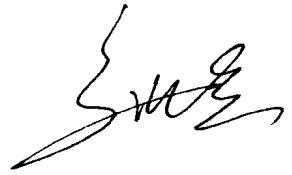
本书共分十二章，第一、二章主要从理论和概念上对电力系统安全稳定进行系统阐述；第三～九章紧扣工程应用，先从功角稳定控制，频率、电压控制，异步运行控制三个方面论述电力系统安全稳定控制的工程应用方法，然后具体介绍了安全稳定控制系统的具体实施方案、安全稳定控制装置集中管理系统，并列举了若干典型安全稳定控制工程案例；第十～十二章阐述当前安全稳定控制技术面

临的新环境和新技术，主要包括 IEC 61850 环境、新能源接入、交直流混联电网等形势下的安全稳定控制技术，以及近年出现的一些新判据、新算法。

本书能顺利出版，要特别感谢中国工程院薛禹胜院士对编者们多年来的关心和指导、对稳定技术的倾心关注，感谢他对本书提出了很多宝贵意见，并在百忙中为本书写序。

感谢编委会全体成员所付出的大量心血和汗水，感谢国家电力调度通信中心专家们的关心和帮助，还要感谢中国电力出版社有关同志在出版过程中的大力支持。

本书涉及电网安全稳定控制的一些新方向和新技术，由于编者水平有限，疏漏和不足甚至于错误在所难免，希望读者批评指正。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '薛禹胜' (Xue Yusheng), written in a cursive style.

2011 年 10 月于南京

## 编委会名单

主 编	肖世杰			
副主编	吴维宁	薛禹胜		
编委成员	方勇杰	罗剑波	周 济	徐泰山
	李雪明	姬长安	薛 峰	蓝海波
	宋锦海	李惠军	宣筱青	陈 泓
	王 阳	孙玉军	陈永华	任建锋
	颜云松	徐 军	叶振风	李德胜
	董希建	李志辉	赵彦丽	张 倩
	左 萍	沈 严	李明应	张维宁



# 目 录

## 序 前言

<b>第一章 电力系统安全稳定性的现象与本质</b> .....	1
第一节 电力系统的扰动 .....	1
第二节 电力系统稳定性的定义和分类 .....	2
第三节 有关电力系统性能的定义 .....	11
<b>第二章 电力系统安全稳定控制概述</b> .....	16
第一节 电力系统稳定控制的概念、类型及作用 .....	16
第二节 电力系统安全稳定的第三道防线 .....	24
第三节 大停电事故案例 .....	24
<b>第三章 电力系统安全稳定控制机理及方法</b> .....	29
第一节 电力系统稳定控制机理分析 .....	29
第二节 提高系统稳定性的措施 .....	33
第三节 分布式安全稳定控制装置中的关键技术 .....	35
第四节 控制策略表的通用搜索技术 .....	47
<b>第四章 频率、电压异常及其控制</b> .....	51
第一节 频率异常及控制 .....	51
第二节 电压异常及控制 .....	53
第三节 频率电压紧急控制装置的原理 .....	54
<b>第五章 异步运行状态及其控制</b> .....	63
第一节 电力系统异步运行的危害及特征 .....	63

第二节	失步判据及其控制方案	65
第三节	电力系统对失步解列装置的要求	75
第四节	基于相位角变化规律的失步解列装置	77
<b>第六章</b>	<b>安全稳定控制系统的方案设计</b>	<b>81</b>
第一节	安全稳定控制系统概述	81
第二节	安全稳定控制系统的方案设计	82
<b>第七章</b>	<b>安全稳定控制集中管理系统</b>	<b>102</b>
第一节	管理系统与安全稳定控制装置的通信方式	103
第二节	系统典型硬件架构	106
第三节	系统软件结构	107
第四节	系统基本功能	109
第五节	系统高级功能	114
第六节	管理系统与安全稳定控制装置交互信息和传输规范建议	129
第七节	安全稳定控制装置集中管理系统实用产品介绍	138
<b>第八章</b>	<b>典型安全稳定控制系统工程</b>	<b>140</b>
第一节	典型交流联网（西北—新疆 750kV 联网） 安全稳定控制系统工程	140
第二节	典型直流联网（±660kV 宁东直流）安全稳定控制系统工程	143
第三节	典型交直流混联电网（德宝直流）安全稳定控制系统工程	147
第四节	特高压直流联网（复奉特高压直流）安全稳定控制系统工程	149
第五节	自适应控制典型案例（江苏 EACCS 系统）	152
<b>第九章</b>	<b>安全稳定控制装置的检验及运行维护</b>	<b>156</b>
第一节	安全稳定控制装置的检验	156
第二节	安全稳定控制装置的运行维护	160
<b>第十章</b>	<b>智能变电站环境下的安全稳定控制技术</b>	<b>166</b>
第一节	智能变电站对安全稳定控制装置的影响	166
第二节	智能变电站安全稳定控制装置的设计	171
第三节	智能变电站安全稳定控制装置及其测试系统	174
<b>第十一章</b>	<b>新能源并网运行的安全稳定控制技术</b>	<b>181</b>
第一节	集群风电安全稳定控制技术	181

第二节	光伏电站安全稳定控制技术·····	185
第三节	集群风电安全稳定控制技术的典型应用·····	188
<b>第十二章</b>	<b>安全稳定控制新技术·····</b>	<b>203</b>
第一节	跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析·····	203
第二节	交直流混联电网的安全稳定控制·····	211
第三节	基于本地电气量的无故障跳闸新判据·····	220
第四节	一种基于本地电气量的智能低压切负荷算法·····	234
第五节	综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法·····	241
第六节	基于多代理技术的低频低压减负荷控制·····	249
第七节	适用于特高压电网的基于相位角原理的失步解列改进方案·····	260
第八节	基于广域信息的电网解列控制技术展望·····	267
<b>参考文献</b> ·····		<b>274</b>

## 第一章

# 电力系统安全稳定性的现象与本质

## 第一节 电力系统的扰动

保障系统安全一直是电力系统运行中的头等大事。安全程度不足的系统容易发生严重的甚至是灾难性的事故。近年来，互联电网规模的扩大和电力市场机制的实施使得系统的扰动源增加，系统的鲁棒性减弱，运行的可预测性减小。

安全性和稳定性是相互关联的概念，都是关于电力系统性能的描述，主要涉及系统对于可能发生的扰动的鲁棒性。

电力系统中的扰动有许多种，如雷电和操作过电压、短路故障、元件开断、负荷波动等。相应的连续或离散的控制措施也有许多，在广义上也可以看成是对系统的扰动。由雷电和操作引起的电磁暂态过电压属于过电压研究的范围，与运动方程无关，不属于本书讨论范围。

为分析方便起见，电力系统的扰动通常分为小扰动和大扰动。小扰动是指由于负荷的正常波动、功率和潮流控制、变压器分接头调整和联络线功率自然波动等引起的扰动；大扰动是指由系统元件短路、切换操作和其他较大的功率或阻抗变化引起的扰动。

最常见的大扰动场景是线路发生短路故障后，继电保护、开关及重合闸正确动作将短路故障快速切除。DL755—2001《电力系统安全稳定导则》将大扰动按扰动严重程度和发生概率分为三类。

电力系统中的扰动如果处理不当或不及时，可能发展扩大为系统性事故，甚至可能造成大面积停电。例如，一个或多个系统设备由于过负荷而退出运行后，由于潮流转移而引起系统中其他设备过负荷，如果这种状况未能得到及时消除，可能会导致更多元件的相继跳闸。这种扰动形态通常称为“连锁故障”，是由一

系列互为因果的事件形成的故障发展过程。

连锁故障是相继故障的一种类型，两者均属于多重故障。相继故障中的事件之间可以没有因果关系，例如，不同地点之间的线路在一定时间内先后发生故障跳闸。

区分扰动的大小并没有很好的标准，而同样的扰动对同一系统的不同工况可能有完全不同的影响。大扰动后的中长期动态过程也与小扰动问题难以区分，而用分析大扰动稳定性的工具也可以分析小扰动稳定性。

## 第二节 电力系统稳定性的定义和分类

世界上多次大停电都是由电力系统的失稳事故引起的。因此，电力系统稳定是关系电力系统安全运行的首要问题。长期以来，大多数系统的主要问题是暂态功角稳定问题，随着互联电网规模的逐步扩大，新技术的出现和新控制手段的应用，系统逐渐运行在重载状态下，各种失稳形态也相继出现，如电压稳定、频率稳定、低频振荡等。充分了解各种失稳现象及其相互关系，是合理设计和运行电力系统的关键。

与其他任何动态系统的稳定性类似，电力系统稳定性也有牢固的数学基础，其严格的数学定义可参阅有关动态系统稳定性数学理论的文献。本节的目的是从电力系统稳定性的物理特性的角度，介绍与其严格数学定义相一致的物理概念。

### 一、IEEE/CIGRE 的电力系统稳定性定义和分类

#### 1. 电力系统稳定性的定义及诠释

电力系统稳定性是指电力系统在给定的初始运行工况下受到一个物理扰动后重新回到运行平衡点，且在该平衡点大部分系统变量都未越限，从而整个系统保持完整性的能力。

该定义适用于作为一个整体的互联系统，也适用于某一台或一组发电机的稳定性，如一台远方的发电机可能失去稳定（同步），而主系统保持稳定。类似地，可能会关心特定的负荷或负荷区域的稳定性。电动机可能失去稳定（减速直至堵转），而不会引发主系统失稳。

电力系统是高度非线性的系统，运行在处于不断变化中的环境下，负荷、发电机出力以及关键运行参数都在随时变化。受到扰动后，系统稳定性不但取决于系统初始运行工况，也取决于扰动的性质。电力系统的稳定性是系统在平衡点（即

初始工况)周围运动的稳定性。

电力系统时刻遭受到各种各样的扰动。小扰动(如负荷的变化)时刻在发生,系统必须能够适应工况的变化,保持稳定运行。系统还必须能够承受各种严重扰动,如输电线短路故障或失去一台大型发电机。由于要隔离故障设备,大扰动可能会导致系统结构上的变化。

在同一个平衡点,电力系统受到某一扰动是稳定的,但受到另一扰动则可能失去稳定。要使电力系统在每个可能的扰动下都能够保持稳定,既不现实,也不经济。分析时所选择的预想故障都有相当高的发生概率。因此,大扰动稳定性总是与指定的扰动场景相关联,且稳定平衡点具有有限的吸引域。该域越大,系统对于大扰动的鲁棒性越强。吸引域的大小随着系统运行工况的变化而变化。

受扰系统的响应与系统中的设备密切相关。例如,一个关键设备发生故障后,相应的继电保护装置动作将其从系统中隔离,引起线路潮流、母线电压和机组转速的变化;电压变化引起发电机和输电网络侧电压调节器的动作;发电机转速的变化进一步导致原动机调速器的动作;电压和频率的变化会引起系统中各个负荷依据各自的特性不同程度地发生变化。此外,用于保护单个设备的保护装置会反应于系统变量的变化而可能从系统中切除相应的设备,因而进一步削弱系统甚至导致系统失去稳定。

一个扰动过后,稳定的系统会达到一个新的平衡状态,系统的完整性得以维护,即几乎所有的发电机和负荷通过一个联成一体的网络连接在一起。为了保持主干系统的连续运行,某些发电机和负荷可能被为隔离故障元件的保护动作或为保持系统稳定的自动或人工控制动作而切除。互联系统在某些严重故障下,也可能被有计划地解列成两个或多个子系统,以保持尽可能多的发电和负荷。自动控制和调度员操作将使系统最终恢复正常状态。相反地,如果系统不稳定,将导致状况失控,例如,发电机功角间隙的不断增大或母线电压的持续下降。系统失稳可能导致连锁跳闸和大面积停电。

电力系统时时刻刻都在经历小的波动。但是,当评估系统在遭受给定扰动下的稳定性时,一般都假定系统在初始状态下处于稳态运行工况。

## 2. 电力系统稳定性的分类

电力系统的运行是一个复杂的多变量交互过程,其动态响应受到大量具有不

同特性和不同响应速度的设备的影响。随具体的网络拓扑、系统工况和扰动形式的不同，各种相互对立的力量可呈现出持续的不平衡，而导致系统以不同形态失去稳定。

电力系统稳定性在本质上是一个完整的问题，但如果作为单一问题来对待，对于系统所经历的各种失稳形式不能彻底掌握和有效应对。鉴于稳定问题的高维性和复杂性，需要进行合理的简化假设，采用适当详细的系统模型和恰当的分析技术来分析特定类型的问题。对稳定性进行分类有利于稳定分析，包括识别导致失稳的关键因素，设计改善系统稳定性的方法等。

电力系统的失稳现象可以通过考虑下列因素进行分类：①由可观察到失稳现象的系统主要变量所呈现的失稳模式的物理本质；②影响稳定分析和预测方法的扰动的大小；③为评估稳定性而必须考虑的设备、过程和时间跨度。

图 1-1 所示为 IEEE/CIGRE 电力系统稳定问题的分类。

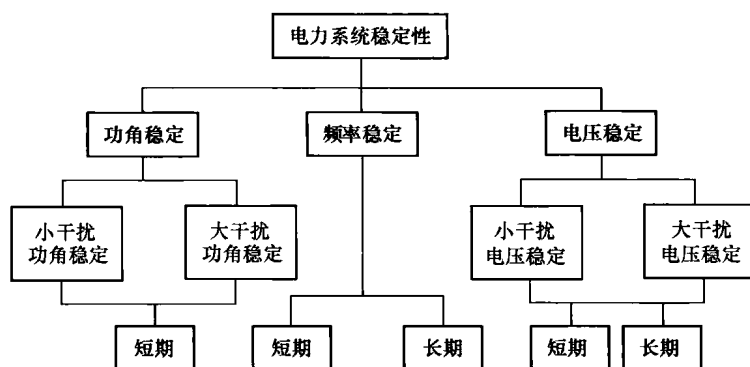


图 1-1 IEEE/CIGRE 的电力系统稳定问题的分类

### 3. 功角稳定

功角稳定指的是互联电力系统中的同步发电机在正常运行状态下和受到扰动时维持同步运行的能力。功角稳定性取决于系统中各台发电机在电磁转矩和机械转矩之间维持或恢复平衡的能力，失稳的形式则表现为某些发电机相对于其他发电机的功角摆动不断增大直至失去同步。功角稳定进一步分为小干扰（或小信号）稳定和暂态稳定，前者指的是系统在小扰动情况下维持同步运行的能力，后者指的是系统遭受大扰动时维持同步运行的能力。

功角稳定问题涉及对电力系统固有的机电振荡现象的研究，其基本要素是同步发电机的功率输出随着功角变化的方式。稳态运行时，每台发电机输入的机械转矩和输出的电磁转矩达到平衡，转速保持恒定。

如果系统受到扰动，这种平衡就会被打破，导致发电机转子按照旋转物体的运动规律加速或减速。如果一台发电机旋转得比另一台快，则其相对于旋转得较慢的发电机的功角将增大。所产生的功角差将使得部分负荷按照功率—角度关系从转得较慢的发电机转移到转得较快的发电机，从而趋于减小两者的转速差及功角间隙。由于功率—角度关系具有高度的非线性，超过一定的限度后，角度继续摆开反而会使功率转移减小，进一步导致功角差变大。如果系统不能够吸收与转子速度差相对应的动能，就会失去稳定。在给定条件下，系统的稳定性取决于转子角度位置的偏移是否会带来足够的恢复转矩。失去同步可发生在一台机与系统之间，也会发生在每个机群内部都同调的不同机群之间。

受到扰动后同步发电机的电磁转矩的变化可以分解为两部分：①与功角偏移同相位的同步转矩分量；②与速度偏移同相位的阻尼转矩分量。

系统稳定与否取决于每台发电机中是否都具有这两个分量。同步转矩不足会导致非周期或非振荡失稳，而缺乏阻尼转矩会导致振荡失稳。

为方便分析，并深入了解稳定问题的本质，将功角稳定问题分为以下两类：  
(1) 小干扰（或小信号）功角稳定。

小干扰（或小信号）功角稳定是关于电力系统在小扰动情况下维持同步运行的能力。这里所指的扰动要足够小，以便在分析时允许将系统方程线性化。

小扰动稳定取决于系统的初始运行状态。失稳可以有两种形式：①由于缺乏足够的同步转矩而导致功角以非周期或非振荡的形式不断增大；②由于缺乏足够的阻尼转矩而导致功角增幅振荡。

在现代电力系统中，小扰动功角稳定问题一般与振荡阻尼不足有关。虽然非周期失稳问题基本上已经通过采用发电机连续电压调节器得到解决，但是当发电机励磁限制器动作导致发电机运行在恒定励磁状态时，仍有可能发生非周期失稳。

小扰动功角稳定问题可能是局部问题，也可能是全局问题。局部问题涉及电力系统的一小部分，常常是一个电厂相对于系统其余部分发生功角振荡。这种振荡被称为本地模式的振荡，其稳定性（阻尼）取决于从电厂侧看到的输电系统的



强度、发电机励磁控制系统和电厂出力。全局问题由大机群之间的交互作用引起，且影响范围广。该问题涉及一个区域中的一群发电机相对于另一区域中的一群发电机之间的振荡，被称为区域间振荡模式，其特性非常复杂，且与局部模式的振荡明显不同。特别是负荷特性对区间振荡模式的稳定性具有重大影响。

小扰动稳定性研究中的时间段一般是在扰动发生后 10~20s 之间。

## (2) 大扰动功角稳定性或暂态稳定。

大扰动功角稳定性或暂态稳定性是电力系统受到严重扰动(如输电线路短路)后维持同步运行的能力。受扰系统的响应以发电机功角的大偏移为特征，且受功率—角度非线性关系的影响。

暂态稳定性不但取决于系统的初始运行状态，还取决于扰动的严重程度。失稳常常表现为首摆失稳，即由于同步力矩不足而导致功角非周期性地摆开。然而，在大型电力系统中，暂态失稳不一定总是表现为单一模式的首摆失稳，而可能会是慢速的区间振荡模式与就地振荡模式叠加的结果，引起首摆后转子角度的大偏移；也可能是系统非线性影响单一模式的结果，引起首摆之后的失稳。

暂态稳定研究中的时间段一般是扰动后 3~5s。对具有区域主导模式的大型电力系统，可能延长至 10~20s。

小扰动功角稳定和暂态稳定均归类为短期稳定现象。

术语“动态稳定”也作为功角稳定的一类在一些文献中出现。然而，不同的作者用其来描述不同的现象。在北美的文献中，主要用于表示有自动控制（特别是发电机励磁控制）时的小扰动稳定性，以区别于传统的没有发电机控制的“静态稳定”概念。在欧洲的文献中，则用于表示暂态稳定。鉴于“动态稳定”术语的使用已经引起许多混乱，像以前的 IEEE 和 CIGRE 工作组一样，建议不采用该术语。

## 4. 电压稳定

电压稳定指的是系统在正常运行状态下和受到扰动时，所有母线维持稳定电压水平的能力。它取决于电力系统在负荷需求与系统向负荷供电之间维持/恢复平衡的能力。电压失稳的形式可表现为某些母线的电压不断上升或下降。引起电压失稳的主要因素是系统不能够维持无功功率的平衡。发生电压失稳的后果可以是损失区域负荷，或保护系统动作引起输电线路和其他元件跳闸，进而导致连锁故障。元件跳闸或励磁电流越限还可能导致某些发电机失步。大干扰电压稳定性指