



国家电网公司
电力科技著作出版项目

大电网 故障隔离技术

马世英 丁 剑 秦晓辉 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

网 公 司
出版项目

大电网 故障隔离技术

马世英 丁 剑 秦晓辉等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

在我国,当互联系统遭受大扰动的影响而失去同步时,失步解列作为防止系统崩溃的最后一道防线得到了广泛的应用。随着电力系统的发展,电网的结构更加复杂,对失步解列方案的要求也越来越高。借鉴和采取电力系统紧急控制技术领域相关新技术的发展成果,引入更多的控制手段和技术,推进大电网严重故障下的失步振荡控制技术研究具有重要的意义。

本书针对未来电网的新特征,对大电网严重故障下引发的失步振荡现象展开了详细的分析,结合我国历史、当前及未来实际电网的仿真验证情况,论述了大电网失步振荡的轨迹及动力学特征、失步振荡中心分布特征、失步振荡中心迁移规律及失步振荡中心迁移的影响因素。在此基础上,论述了解列控制技术中解列动作时间及解列断面选择和配合问题、传统基于就地量信息的解列判据及工程应用、新型基于广域信息的解列技术及工程应用。针对未来规划电网中可能存在的现有解列措施难以应对的解列难点问题,突破传统解列技术的范畴,从电网规划,多措施综合,协调配合,二、三道防线措施交叉引入等角度论述了多种广义故障隔离技术,构建了未来大电网故障隔离的可能技术框架,展望了具体隔离技术的发展趋势。

本书可供从事电力系统运行控制的科研人员和电网调度运行人员阅读,也可作为电力系统自动化及相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大电网故障隔离技术 / 马世英, 丁剑, 秦晓辉著. —北京: 中国电力出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5198-2029-9

I. ①大… II. ①马…②丁…③秦… III. ①电网-故障定位 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第094369号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 邦兴庆(010-63412376)

责任校对: 太兴华

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2018年6月第一版

印 次: 2018年6月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 9.25

字 数: 202千字

印 数: 0001—1000册

定 价: 58.00元



版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

本书编写人员

主 编 马世英

编写人员 丁 剑 秦晓辉 陈长胜 杨学涛 宋云亭

本书编委会成员

吴丽华 唐晓骏 郑 超 杨海涛

张志强 李 东 吕 熹 何静波

序 言

电力系统稳定破坏可能引起大面积停电，是电力工业最严重的事故之一。国内外长期的运行实践表明，即使对系统稳定性标准提出了非常严格的要求，采取了多种新技术和管理措施，但总有可能因为一些事先难以预料的偶然因素叠加，在遇到大扰动时就会出现连锁事故，导致系统稳定性破坏，机群之间失去同步，如果紧急处置不当，将发生电网崩溃、大面积停电，造成巨大的经济损失和社会影响。为此，我们应不断深入研究防止稳定破坏的有效措施，并且力争在检测到机群之间失去同步时，快速将电力系统解列成各自可以保持同步运行的分区电网，使分区电网处于可控范围，避免事故扩大、系统瓦解。

在电网发展的初期阶段，规模较小、电源布局及电网结构较为简单，使用基于两机模型的传统失步判据能够正确判断失步状态，只要通过离线分析计算，找出可能的失步断面，在区间联络线或大电厂出线配置失步解列装置，就能在电力系统失去同步时实现解列。近年来，随着大型水电基地、火电基地以及可再生能源基地的大规模接入电网，特高压直流远距离输电容量不断增加，电网已呈现出“强直弱交”的新特征，在这一特征下，交流系统的短路故障和直流换相失败、闭锁事故，对电力系统的冲击影响已呈现出全局化趋势。基于长期对传统交流系统特性形成的认知、安全防御理念及稳定控制方法，已难适应特高压交直流混联电网在目前及今后相当长的过渡期内的发展的需要，失步振荡过程中振荡中心的迁移及多频振荡等复杂场景，使得基于就地信息的传统失步解列控制已经难以适应，现有的失步解列控制方案面临巨大挑战。

在上述背景下，本书应运而生，作者及其研究团队在总结前人已有研究的基础上，密切结合国内电网过渡期出现的复杂场景和近年来依托科技项目所取得的主要研究成果及提出的解决方案，精心编著成书。本书针对未来电网的新特征，对大电网严重故障引发的失步振荡现象展开了详细的分析，论述了电网失步状态特征、失步振荡中心分布特点、失步振荡中心迁移规律及失步振荡中心迁移的影响因素，讨论了解列动作时间、解列断面选择和相互配合等问题，指出了传统基于就地量信息的解列判据及工程应用中可

能存在的问题，对新型基于广域信息的解列技术进行了研究，并提出应用方案，为构建未来现代大电网故障隔离技术框架打下了基础。本书有理论研究、有实际系统故障场景、有解决方案、有对未来解列技术的展望，为从事电力系统稳定技术研究和应用的同行们呈献了一本难得的最新的好参考资料。愿本书的出版发行，能在电力系统故障隔离技术发展过程中起到承前启后的作用，使我国电力系统三道防线不断得到加强，为电网的安全和国家的经济建设保驾护航。

孙光辉 2018年1月

前言

电力工业是世界各国经济发展的支柱，电力系统的安全、稳定与否与国计民生休戚相关。随着我国电力需求的快速增长以及全国联网战略的实施，我国电网的互联程度不断提高，规模日益扩大。同时，随着化石能源枯竭和气候变暖等环境问题的恶化，电源结构也将不断调整，化石能源发电的比例将有所减少，非化石能源发电的比例将趋于增加，未来风电、太阳能、生物质能等可再生能源的比例及核电的比例将有较大的提高，西南水电、西北及北部煤电基地和风电基地、东部核电及分布式新能源发电需要加快开发，而我国负荷中心基本位于中东部地区。上述我国能源和负荷分布不均衡特点决定了在未来较长的发展时期内，我国电网仍将以大规模电源接入电网、通过特/超高压长距离交直流大规模电力输送为主要特点。

电网大规模互联有利于资源的分配和系统稳定性的提高，但也给系统的安全稳定运行带来了挑战。电力系统长期的运行实践表明，如果对稳定破坏事故处理不当，将造成严重的经济与社会损失。1965年美国“东北部停电事故”造成2100万kW的负荷停电，最长停电时间达13h，停电区域为20万km²，影响到3000万居民用电；2003年的“美加8·14大停电”事故，使美国东北部和加拿大东部互联电网累计损失负荷6180万kW，停电影响范围波及美国6个州和加拿大2个省的广大地区；同年9月28日，意大利全国大停电，造成民航、铁路等系统的中断，并给居民的生活造成了极为严重的影响；2005年8月24日的“莫斯科大停电”，停电时间长达29h，先后涉及25个城市，导致整个莫斯科市陷入瘫痪。

这些事故发生的原因有很多，其中非常重要的一项是电力系统本身正在发生深刻的变化：一是电网规模越来越大，电网互联加强，以我国为例，随着三峡大型水利枢纽的建成及西电东送工程的实施，一个全国范围的由输电网、发电机及负荷组成的复杂大型互联电力系统已经建成；二是电力系统的运营模式由传统的垄断经营逐步向电力市场转变，目前很多国家已经完成或正在进行电力市场改革。上述变化对电网的安全稳定运行带来了严峻考验。其中电网互联使电力系统的规模越来越大，大量超高压、大容量电力

设备和新型电力元件通过超大规模电网连接在一起。在电网运行过程中，这些电力元件之间发生的物理变化相互制约，相互影响，使这样一个大电网上发生的物理过程异常复杂，很难认识和把握，大大增加了电网运行和监管工作的复杂程度，同时电网互联的加强，使其一旦发生故障，波及的范围和影响的程度也非常大；而电力市场化的发展方向，使电网的动态行为越来越复杂，电网运行日益接近其运行极限，调度控制难度增加，电网的安全稳定问题日趋突出。

随着西电东送、南北互供、大区联网的实施，我国电网对严重故障下的隔离控制技术的要求也越来越高，亟待针对我国大区互联电网的实际情况，开展相关研究。目前电网故障隔离的研究多集中在中低压配电网，尤其是对配网自动化下的故障隔离手段做了大量研究。输电网事故方面的相关研究主要集中在故障诊断、连锁故障机理和防控方面。与中低压配电网中旋转元件较少，稳定问题不太突出的特点不同，大电网发生严重故障后，通常表现为系统失步，因此简单的故障隔离并不能消除故障带来的稳定问题。目前应对大电网严重故障导致的系统失步的主要措施即为解列措施，其他事故隔离措施应用较为少见。

国内电网近年来安装的失步解列装置正确动作多次，基本上满足了电网需要，对确保电网的安全稳定运行发挥着重要作用。但随着电力系统的发展，电网的结构更加复杂，对失步解列方案的要求也越来越高。现有大多数电网解列判据都是基于双机模型或者单机无穷大模型，存在一些不足：失步解列装置的动作大多基于就地信息，并且对于失步的最明显特征——区域间功角逐渐拉开的判断也是通过其他电气量间接反映的，其判据仅能反映一种或几类失步特性，在复杂电力系统中整定困难；多数判据不完善，并且实际应用中多套装置的配合很困难。此外，预设的解列点也不一定合适，大多数判据是针对等值两机系统的，对于多群失步振荡，目前的方法在失步振荡判据和解列点选择上都可能失效。

随着计算机和现代通信技术在电力系统中的广泛应用，研究系统性的振荡检测和失步解列控制越来越受到人们的重视。20 世纪 90 年代兴起的同步相量测量技术已被一些学者应用于失步解列控制之中。解列控制作为一种针对系统的保护，其设计应从系统的角度出发，在发生大扰动时，及时发现系统中的失步机群，动态地确定解列点和各解列点的动作时序，以防止事故扩大。随着电网供电安全性和可靠性要求的不断提高，解列策略的研究正经历着从固定解列点的被动选择到自适应解列点的主动配置等方面的进步。

同时,随着现代电网规模、结构、运行控制等各方面复杂程度的加深,电网严重故障下的失步振荡也将呈现一系列新的特征,如多种稳定问题耦合、失稳模式复杂、隔离断面复杂、振荡中心跃迁情况复杂、电网解列装置配置复杂、故障暂态冲击严重等,这些新问题的出现使原有失步解列已无法满足电网需要。因此,借鉴和采取电力系统紧急控制技术领域相关新技术的发展成果,引入更多的控制手段和技术,推进大电网严重故障下的广义故障隔离控制技术研究也具有重要的意义。

本书的第1章从电网扰动、稳定问题的分类、失步振荡影响及振荡解列等方面概述了大电网严重故障引发的功角稳定问题及其控制措施,力求给出全书所涉及技术内容的一个简要的全貌介绍。第2章和第3章针对大电网严重故障下引发的失步振荡现象展开了详细的分析,结合我国历史、当前及未来实际电网的仿真验证情况,论述了大电网失步状态的特征、失步振荡中心的分布特征、失步振荡中心的迁移规律及失步振荡中心迁移的影响因素。在此基础上,第4章~第6章针对大电网传统意义下的故障隔离即解列技术,分别论述了解列控制技术中的解列时间及解列断面的配合与优化、基于就地信息的故障隔离控制、基于广域信息的故障隔离控制。第7章和第8章则针对未来规划电网中可能存在的现有解列措施难以应对的解列难点问题,突破传统解列技术的范畴,从电网规划,多措施综合,协调配合,二、三道防线措施交叉引入等角度论述了多种广义故障隔离技术,构建了未来大电网故障隔离的可能技术框架,展望了具体隔离技术的发展趋势。

目 录

序言

前言

1	大电网严重故障下的稳定问题及其控制措施概述	1
1.1	大电网严重故障	3
1.2	稳定问题的分类	4
1.3	三道防线措施	7
1.3.1	三级安全稳定标准	7
1.3.2	三道防线配置	8
1.4	功角稳定问题引发的失步振荡	9
1.5	振荡解列控制	10
1.5.1	基于就地信息的解列控制	10
1.5.2	基于广域信息的解列控制	11
1.5.3	解列控制的协调配合	12
	参考文献	12
2	大电网失步振荡的特征	15
2.1	失步振荡的轨迹特征	17
2.1.1	简单两机系统	17
2.1.2	复杂多机系统	23
2.2	失步振荡的动力学特征	25
2.3	失步振荡中心的分布特征	26
2.3.1	我国典型电网振荡中心分布的特征	26
2.3.2	故障扰动对振荡中心分布的影响	31
	参考文献	31

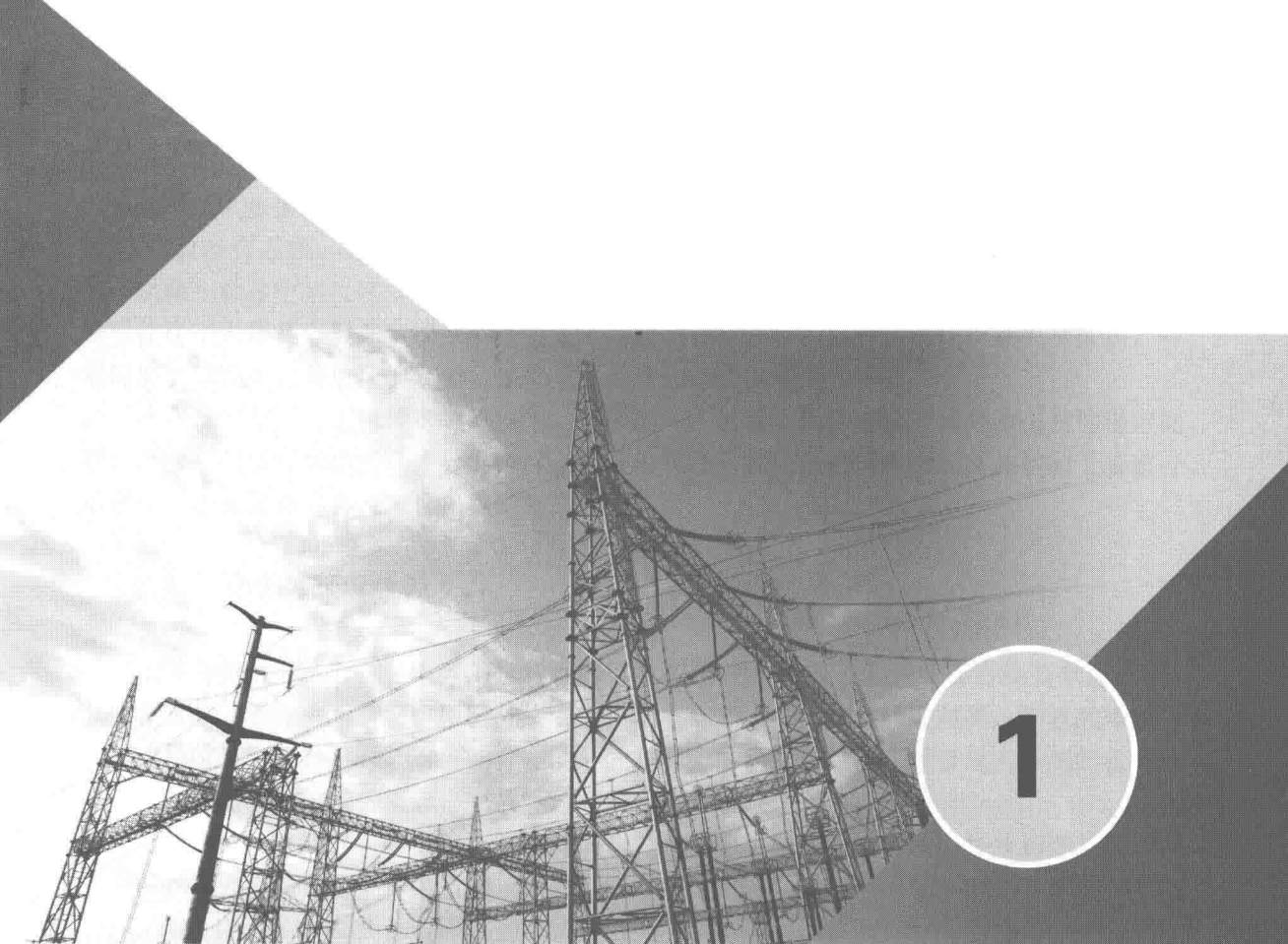
3 大电网失步振荡中心的迁移规律分析	33
3.1 振荡中心的连续性迁移	35
3.2 振荡中心的大范围迁移	38
3.2.1 振荡中心在多失步断面间迁移	38
3.2.2 新振荡激发下的振荡中心迁移	39
3.2.3 电网结构改变下振荡中心未落入预想区域	41
3.3 振荡中心的迁移类型及防控重点	43
3.4 振荡中心迁移的影响因素	44
3.4.1 FACTS 装置	44
3.4.2 间歇性可再生能源	47
3.4.3 连锁故障	50
3.4.4 安控切机	51
3.4.5 高频切机	52
3.4.6 解列措施	53
参考文献	54
4 解列时间和解列断面的选取与配合	59
4.1 暂态能量的分解与再分解	61
4.1.1 全系统暂态能量函数	61
4.1.2 群间暂态能量函数	62
4.1.3 群内暂态能量函数	63
4.1.4 群内暂态能量的再分解	64
4.2 多群振荡下解列时间的选择	64
4.3 解列断面的选择	66
4.3.1 多群振荡	66
4.3.2 多解列断面	68
4.4 解列时间和解列断面的配合与优化	70
参考文献	71

5	基于就地信息的故障隔离控制	73
5.1	利用测量阻抗变化的失步解列控制	75
5.2	基于振荡中心电压变化规律的失步解列控制	77
5.3	基于电压电流相位角原理的失步解列控制	79
5.4	利用有功功率及功角变化趋势的失步解列控制	82
	参考文献	83
6	基于广域信息的故障隔离控制	85
6.1	自适应解列	87
6.1.1	解列原理分析	87
6.1.2	稳定裕度求取	89
6.1.3	WAMS 动态轨迹量化分析	90
6.1.4	观察断面与分群判据选取	91
6.1.5	滑步 DSP 和失稳 DSP 的判别	91
6.1.6	自适应解列判据流程	92
6.1.7	自适应失步解列优化	92
6.1.8	仿真算例	94
6.2	基于广域信息解列的工程化应用	99
	参考文献	100
7	广义故障隔离	101
7.1	大电网故障隔离的难点问题	103
7.1.1	稳定问题复杂	103
7.1.2	失稳模式复杂	104
7.1.3	电网结构复杂	104
7.1.4	振荡中心迁移情况复杂	106
7.1.5	解列装置配置复杂	106
7.1.6	故障冲击严重	108
7.2	综合故障隔离和抑制策略	109
7.3	故障隔离的规划技术	110

7.4 基于机组同调性配合策略	111
7.4.1 同调分群方法研究现状	111
7.4.2 基于同调分群的解列措施配合	112
7.5 大电源重载送出通道的切机策略	112
7.6 扰动源定位故障隔离	114
7.6.1 低频振荡在线防控框架	114
7.6.2 多信息源数据整合	116
7.6.3 低频振荡在线监测	117
7.6.4 低频振荡抑制措施在线计算	118
7.6.5 强迫振荡扰动源定位	121
7.6.6 算例分析	121
参考文献	125

8 发展及展望

8.1 大电网故障隔离技术框架	131
8.2 安全防御技术展望	133
8.2.1 大电网故障扰动快速识别技术	133
8.2.2 实时决策和实时控制的安全稳定控制技术	133
8.2.3 防止大型互联电网大面积停电的故障阻隔技术	133



1

大电网严重故障下的稳定问题 及其控制措施概述

大电网严重故障往往是由一系列错综复杂的因素和事件综合作用的结果。严重故障及其引发的系统失步振荡问题的复杂性不但来源于其高维、时变、非线性特性，以及微分-差分-逻辑-代数混合系统，还反映在多领域（物理、经济、信息）、多物理量（电压、电流、频率、功角）和多空间尺度（局部模式、全局模式）等方面。尽管完全避免大电网严重故障的发生往往不太现实，但在系统受到严重故障的影响导致失步振荡时，快速消除失步振荡，有效隔离故障影响，避免全面崩溃，保障重要负荷的持续供电至关重要。

本章首先介绍大电网严重故障发生、发展的一般过程；然后结合严重故障引发的稳定问题，概述目前稳定问题的具体分类情况及相应的三道防线应对措施；最后在此基础上着重介绍其中失步振荡的危害及现有振荡解列措施。

1.1 大电网严重故障

按照常规的分类方法，电网的运行状态可以分为正常状态、紧急状态和恢复状态三种，其中正常状态的电力系统又可以区分为安全正常状态和不安全正常状态两类。严重故障的时间可以持续数秒到数小时，有可能存在明显的时间上的前后延续性，但该电力系统的状态分类方法却没有时间维度的概念，对故障过程的状态分解缺乏针对性。

针对这一具体问题，将大停电事故的演化过程划分为缓慢相继开断、快速相继开断、短暂振荡、系统崩溃和恢复 5 个阶段。以“8·14”大停电事故为例，其演化过程具有明显的 5 个阶段特点，具体如图 1-1 所示。

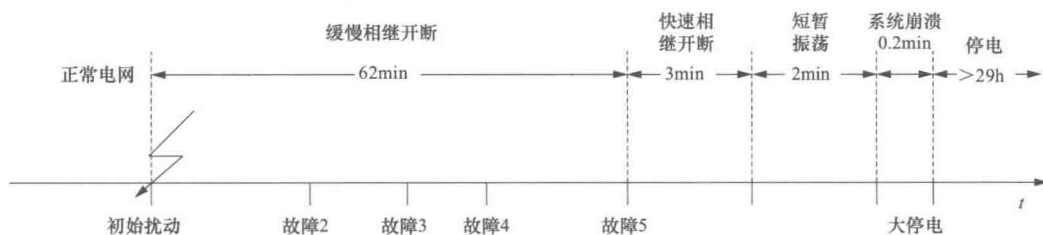


图 1-1 “8·14”大停电事故演变示意图

从故障防控的角度来看，上述的过程分解仍有值得进一步探讨之处。如图 1-1 中的缓慢相继开断和故障发展的后续几个阶段存在明显的区别：在初始扰动后的缓慢相继开断阶段，较长的故障间隔为调度员在决策支持系统的帮助下实施在线安全分析，为避免下一个开断提供了可能；反之，从快速相继开断一直到系统崩溃阶段，故障发生越来越频繁，系统状态快速恶化，暂态过程越来越明显，同时故障间隔的缩短也使人为干预故障过程更为困难，必须依靠相应的紧急控制。

为了更好地进行严重故障的分析及防控，本节将严重故障的一般发展过程归纳为三个阶段，即初始扰动阶段、缓慢相继开断阶段和故障恶化阶段，具体如图 1-2 所示。

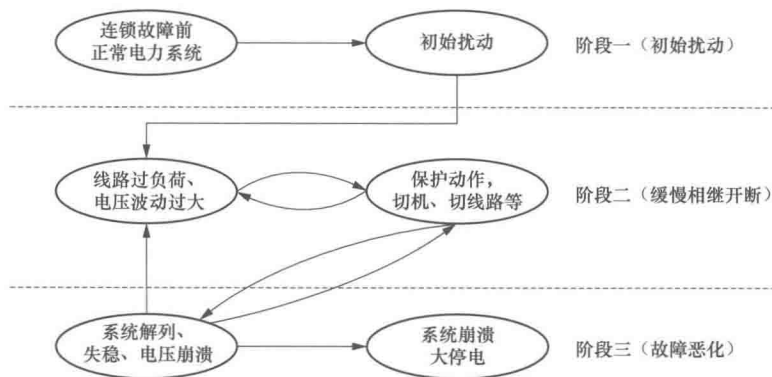


图 1-2 严重故障发展阶段示意图

虽然，在某些严重故障的发展过程中，不一定可以清晰地区分缓慢相继开断和后续的系统状态恶化阶段，对非连锁型严重故障而言，可能没有明显的阶段二的过程，但仍可将它们作为特例纳入上述分析。

1.2 稳定问题的分类

大电网严重故障可能引发各种稳定问题，本节主要介绍电力系统中稳定问题的分类。

电力系统中，稳定的定义可以概括为这样一种电力系统的特性，即电力系统能够运行于正常运行条件下的平衡状态，在受到干扰后能够恢复到可以接受的平衡状态。如果在特定扰动下，系统不能在给定的时间内回到平衡状态，这说明系统失去了稳定性。根据系统结构和运行方式的不同，电力系统的不稳定具有不同的表现形式。对于一个失稳的电力系统而言，理论上系统的功角、电压和频率最终都会失去稳定。但是，实际运行的电力系统作为一个物理系统，在不同的扰动下导致系统失稳的主要因素和趋于失稳状态的路径是不同的，并且需要对应不同的描述模型、分析计算手段和安全稳定控制措施。例如，造成电压失稳的主要因素是系统无功功率不足，而造成频率失稳的主要因素则是有功功率不能满足负荷的需求，两者的机理和特点显著不同，并需要采用不同的系统模型和分析方法进行研究。

根据失稳机理，大电网严重故障引发的失步振荡问题应属于功角稳定问题。IEEE/CIGRE (Institute of Electrical and Electronics Engineer/International Council on Large Electric Systems, 电气与电子工程师学会/国际大电网会议) 稳定定义联合工作组于 2004 年发表的文章 [IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of power system Stability [J], IEEE Transactions on power Systems, 2004, 19 (3): 1387-1401] 及我国 2011 年由国家标准化管理委员会发布的新版《电力系统安全稳定控制技术导则》(GB/T 26399—2011) 中均将电力系统稳定问题划分为功角稳定、电压稳定和频率稳定，但对三类问题的详细定义和分类又略有不同。此处，主要关注功角稳定。