

Wide Area Protection
and Emergency Control
to Prevent Large Scale Blackout

防御大停电的 广域保护 和 紧急控制

袁季修 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

全书内容包括:

- 电力系统安全防御控制概论
- 系统大停电的特点及防御措施
- 消除失步状态的保护及控制
- 防御过负荷连锁跳闸的保护及控制
- 防御频率崩溃的保护及控制
- 防御电压崩溃的保护及控制

防御系统大停电的广域保护和紧急控制的著作。

ISBN 978-7-5083-5182-7



9 787508 351827 >

定价: 28.00 元

防御大停电的 广域保护 和 紧急控制

袁季修 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

● 内 容 提 要 ●

电力系统是一个分布地域很广、包含元件很多、结构很复杂和动态响应很快的大系统,系统中某个元件发生扰动就可能迅速波及全系统。近年来,全球出现多次大范围停电事故,对国民经济和社会生活影响很大。因此,防御大停电、保持电力系统安全稳定运行的问题已受到各方面的高度重视。

本书是介绍防御系统大停电的广域保护和紧急控制的一本著作。本书内容包括:电力系统安全防御控制概论、系统大停电的特点及防御措施、消除失步状态的保护及控制、防御过负荷连锁跳闸的保护及控制、防御频率崩溃的保护及控制、防御电压崩溃的保护及控制。

广域保护和紧急控制与电网结构和运行特点密切相关,本书列举了大量各国电力系统实际应用的安全稳定措施的技术特点和应用情况,这些将对我国从事电力系统运行、设计、科研、管理等工作的人员具有重要的参考价值。本书还可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

防御大停电的广域保护和紧急控制/袁季修编著. —北京:
中国电力出版社, 2007. 3
ISBN 978-7-5083-5182-7

I. 防… II. 袁… III. 电力系统-用电管理 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 006328 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 3 月第一版 2007 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 357 千字
印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

我国电力系统是世界上发展非常快速的系统。截至 2005 年底,装机容量已达 500GW,位居世界第二,至 2006 年底,已突破 600GW。全国各地区已由 330~500kV 输电线路形成骨干电网,并通过 750kV 交流输电线路和 ± 500 kV 直流输电线路实现全国联网。有关部门正在着手建设 ± 800 kV 特高压直流输电线路和 1000kV 特高压交流输电线路,以适应我国西部水电大开发和北部煤炭能源基地的建设。

电力系统的迅速发展、负荷的急速增长、大量超高压甚至特高压交流和直流输电线路的投运,使得现代电力系统的动态特性,包括同调性、失稳模式和关键断面都越来越复杂。电力市场的开放突出了对优化和协调的要求,增加了稳定分析和控制的难度。继电保护的潜在故障、机组的非计划停运、受端无功支持能力、低频振荡、功角稳定和电压稳定等因素更增加了相继故障演化为大停电的风险。

近年来,世界各国曾发生多次影响巨大的大停电事故。如:2003 年 8 月 13 日北美东北部的大停电事故,中断电力约 61.8GW,影响美国和加拿大约 50000000 用户用电;2003 年 9 月 28 日意大利全系统停电事故,中断电力约 27.7GW 等。这些大停电事故给国民经济和社会生活造成了极为严重的损害,引起电力企业及相关部 门的极大重视,所以必须高度加强和完善电力系统的安全防御措施。

安全防御系统分为三类:第一类是正常运行情况下的预防性控制,要求在发生可信的概率较大的故障情况下不致损失负荷。第二类是在较严重且概率较少的故障情况下,能够采取预定措施保证系统稳定运行的紧急控制。第三类是在极端严重且概率极少的故障情况下能够有计划解列系统,防止电压和频率崩溃,保证不致大面积停电。

本人曾在十余年前编著有《电力系统安全稳定控制》一书,书中详细讨论了电力系统的稳定机理及保持稳定措施,同时也探讨了在更严重故障情况下的安全防御措施。本书是在上述著作的基础上更深入讨论系统在极端严重故障下的广域保护和紧急控制,作为安全防御体系的第三道防线。本书的内容重点包括:

- 防御系统失步状态的保护及控制;
- 防御过负荷连锁跳闸的保护及控制;
- 防御系统频率崩溃的保护及控制;
- 防御系统电压崩溃的保护及控制。

第三道防线的特点和系统特定情况密切相关的,本书引入多个电力系统的具体示例以说明问题。

本书承蒙国网南京自动化研究院教授级高工孙光辉审阅全书，他提出了许多宝贵意见。在本书的编写过程中，得到了许多同仁的热情支持和帮助，如国网南京自动化研究院的高级工程师赵希才提供了多篇国际大电网会议（CIGRE）的专题技术报告（technical brochure），电力规划设计总院教授级高工韩元旦热情提供的技术资料等，对编著本书帮助很大。作者在此表示衷心的感谢！

袁孝修

2006 年 10 月

目 录

Contents

前言

第 1 章 电力系统安全防御控制概论	1
1.1 引言	1
1.2 电力系统的安全性能要求	1
1.2.1 电力系统可靠性	1
1.2.2 电力系统稳定性	2
1.3 电力系统的扰动和故障	4
1.3.1 引发系统扰动的因素	4
1.3.2 系统扰动的严重性	6
1.3.3 系统大扰动分类	7
1.4 电力系统的运行状态和安全措施	8
1.4.1 运行状态及安全要求	8
1.4.2 安全防御系统的设置	10
1.4.3 安全防御系统的性能特点	12
1.4.4 安全防御系统设计的若干问题	14
1.5 我国安全防御控制的应用概况	16
1.5.1 我国安全防御技术的发展概况	16
1.5.2 我国安全防御系统的现状	17
1.5.3 安全防御系统应用举例——南方电网	18
1.6 国外安全防御系统概况	22
1.6.1 国外电力系统安全准则	22
1.6.2 国外安全防御系统的应用情况	28
1.6.3 事故扩大原因及对 SPS 的评价	29
第 2 章 系统大停电的特点及其防御措施	34
2.1 引言	34
2.2 国内系统事故情况	34
2.2.1 国内近年系统事故概况	34
2.2.2 国内系统事故举例	35
2.2.2.1 广东电网 1990 年 9 月 20 日大停电事故	35
2.2.2.2 河北南部电网 1992 年 1 月 15 日系统振荡事故	37
2.2.2.3 南方互联系统 1994 年 5 月 25 日中期动态稳定破坏事故	38

2.2.2.4	华北电网 1996 年 5 月 28 日沙岭子电厂事故	42
2.2.2.5	中国台湾电力系统频率 1998 年 7 月 29 日崩溃事故	45
2.2.2.6	海南电网 2005 年 9 月 26 日大停电事故	47
2.3	国外系统大停电事故概况	51
2.3.1	近 20 年国外的系统大停电事故	51
2.3.2	国外大停电事故举例	53
2.3.2.1	法国西部电力系统 1987 年 1 月 12 日电压崩溃事故	53
2.3.2.2	日本东京电力系统 1987 年 7 月 23 日电压崩溃事故	54
2.3.2.3	美国西部电力系统 1996 年 7 月 2 日大停电事故	57
2.3.2.4	马来西亚电力系统 1996 年 8 月 3 日全停电事故	59
2.3.2.5	美国西部电力系统 1996 年 8 月 10 日大停电事故	63
2.3.2.6	美国—加拿大电力系统 2003 年 8 月 14 日大停电事故	65
2.3.2.7	意大利电力系统 2003 年 9 月 28 日大停电事故	70
2.4	系统大停电的特点及其防御措施	73
2.4.1	系统大停电的特点	73
2.4.2	防御系统大停电措施	74
2.4.3	国家处置电网大面积停电事件应急预案	76
2.5	各国防御系统大停电对策的规划	77
2.5.1	美国 WECC 关于极端意外事件的对策	77
2.5.2	加拿大 Hydro-Quebec 系统的防御规划	79
2.5.3	法国 EDF 系统的防御规划	86

第 3 章	消除失步状态的保护及控制	89
3.1	引言	89
3.2	系统失步状态的行为	89
3.2.1	两机简单系统失步状态行为	89
3.2.2	多机复杂系统失步状态行为	94
3.3	消除系统失步状态的控制	96
3.3.1	概述	96
3.3.2	对失步解列控制的要求	96
3.3.3	利用测量阻抗变化的失步解列控制	98
3.3.4	利用两端电动势相角差的失步解列控制	99
3.3.5	利用 U 与 I 的相位差变化规律的失步解列控制	101
3.3.6	利用 $U\cos\phi$ 变化规律的失步解列控制	102
3.4	系统失步解列控制的协调	105
3.4.1	合理选择解列地点的解列控制	105
3.4.2	日本系统的失步解列控制	106
3.4.3	法国 EDF 系统的 DRS 和 Syclopes	109
3.4.4	我国南方系统的失步解列控制	111
3.5	失步状态的暂态特性及再同步	114

3.5.1 失步状态的暂态特性及再同步可能性	114
3.5.2 系统恢复再同步的控制	117
第4章 防御过负荷连锁跳闸的保护及控制	121
4.1 引言	121
4.2 过负荷连锁跳闸及其防护措施	121
4.2.1 过负荷连锁跳闸	121
4.2.2 过负荷连锁跳闸的防护措施	122
4.3 架空线路过负荷及其保护	123
4.3.1 架空线路过负荷能力	123
4.3.2 架空线路过负荷保护	128
4.3.3 基于实时热定额增加架空线容量举例	130
4.4 地下电缆过负荷及其保护	133
4.4.1 地下电缆负荷能力	133
4.4.2 电缆过负荷保护	136
4.5 变压器过负荷及其保护	136
4.5.1 变压器负荷能力	136
4.5.2 变压器过负荷保护	138
第5章 防御频率崩溃的保护及控制	141
5.1 引言	141
5.2 频率偏离额定值的允许限度	141
5.2.1 概述	141
5.2.2 汽轮机叶片允许频率偏差特性	142
5.2.3 世界各国大机组允许频率偏差特性调查	144
5.2.4 我国电网对大机组允许频率偏差特性的要求	146
5.2.5 国外电网对大机组允许频率偏差特性的规定	147
5.3 电力系统的频率特性	150
5.3.1 概述	150
5.3.2 系统频率的静态特性	150
5.3.3 系统频率的动态特性	152
5.3.4 特殊运行状态下的频率特性	153
5.4 低频切负荷系统的策略	157
5.4.1 低频切负荷的基本要求	157
5.4.2 低频切负荷的计算	158
5.4.3 低频切负荷的设置和整定	159
5.5 各国频率保护和控制系统情况	163
5.5.1 俄罗斯统一电力系统频率紧急控制	163
5.5.2 美国电力系统频率紧急控制	166
5.5.3 日本电力系统频率紧急控制	168

5.5.4 其他国家电力系统频率保护和控制	170
第6章 防御电压崩溃的保护及控制	176
6.1 引言	176
6.2 电压稳定性的现象和机理	176
6.2.1 电压稳定性的概念和现象	176
6.2.2 电压稳定性的机理	179
6.3 影响电压稳定性的因素及系统元件	182
6.3.1 负荷特性	182
6.3.2 发电机特性和无功功率控制系统	185
6.3.3 无功补偿设备	187
6.3.4 变压器有载调节分接头 (LTC)	189
6.4 防御电压稳定破坏的控制	191
6.4.1 电压和无功功率多级控制	191
6.4.1.1 电压多级控制概述	191
6.4.1.2 法国二级电压控制系统	191
6.4.1.3 江苏系统多级电压控制系统	194
6.4.2 快速动用无功电源	196
6.4.2.1 日本东京系统的无功功率控制系统	196
6.4.2.2 Hydro-Quebec 的防御电压崩溃保护系统	197
6.4.2.3 瑞典南部防御电压崩溃保护系统	199
6.4.3 变压器 LTC 控制	199
6.4.3.1 LTC 控制概述	199
6.4.3.2 闭锁变压器的 LTC	201
6.4.3.3 降低 LTC 设定点电压	202
6.5 低电压切负荷控制	203
6.5.1 低电压切负荷概述	203
6.5.2 Hydro-Quebec 低电压切负荷系统	205
6.5.3 意大利 ENEL 系统的切负荷控制	208
6.5.4 福建系统在线预决策电压稳定控制	211
6.5.5 各国系统应用低电压切负荷情况	213
6.6 系统过电压及其控制	216
6.6.1 概述	216
6.6.2 超高压电网的工频过电压	217
6.6.3 超高压电网的谐振过电压	219
6.6.4 限制过电压的控制措施	220
参考文献	224

第1章

● 电力系统安全防御控制概论 ●

1.1 引言

电力系统是一个分布地域很广、包含元件很多、结构很复杂和动态响应速度很快的大系统，系统中某处某个元件发生扰动就可能迅速波及全系统。近年来全球出现多次的大范围停电事故，对国民经济和社会生活影响极大。因此，保持电力系统的安全稳定运行，防止发生大面积停电事故，已是我国电力系统面临的极端重要的问题。

我国电力系统的科技工作人员为保证系统安全运行做了大量工作，并提出和普遍配置应用了防御严重故障的“三道防线”^{[2][3]}。第一道防线保证系统在正常运行时有一定安全裕度，保证在常见的适度故障情况下保持稳定和不损失负荷；第二道防线在较严重故障情况下保证不致破坏稳定和扩大事故；第三道防线是在极端严重故障情况下，保证不致系统崩溃及发生大面积停电。本书着重讨论第三道防线的防御措施，包括能控制的解列系统，防御电压和频率崩溃，防御过负荷连锁跳闸等。

本章是对电力系统安全防御控制的综述。它概述了对电力系统安全性能的要求，引述了国际标准和我国标准对电力系统可靠性、安全性和各类稳定性的定义，叙述了电力系统可能承受的各种扰动及其对系统运行的影响。为保证系统安全运行，需要根据扰动情况，采取各种保护和控制措施，包括预防性控制、紧急控制和恢复控制。本章着重讨论关于紧急控制的问题，包括各种广域保护和紧急控制的配置原则和实施要求。

本章还简要介绍我国及世界其他各国的安全准则和防御系统发展和使用情况。

1.2 电力系统的安全性能要求

1.2.1 电力系统可靠性

发输电系统（composite generation and transmission system）或称大电力系统（bulk power system）是统一调度的公用系统的一个组成部分，包括电源、输电线路、联络线以及它们的相关设施^[1]。可靠性、充裕性、安全性和稳定性是发输电系统的主要安全性能要求。

电力系统的基本任务是不间断地向用户供应质量（电压和频率）合乎规定的电能。对其性能要求通常以可靠性表征。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^[1]。

电力系统可靠性包括充裕性和安全性两个方面。量度可靠性的指标可以是确定性的，也可能是概率性的。

（一）充裕性（adequacy）

充裕性是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电力和电量的能力^[1]。

电力系统正常运行应满足两个条件:①系统中任一节点的有功功率和无功功率必须平衡;②系统中各节点或各元件的某些电气参数(如系统频率、节点电压、线路电流、发电机负荷及功角等)不应超过允许偏差。当系统因发电容量短缺和/或输电能力不足而处于不能满足上述条件的状态时,即认为充裕性不足。

充裕性要求在较长的时间内考核,充裕性的具体指标用给定时间区间内系统不能满足负荷需求的概率、时间、频率或是造成负荷需求电力或电量等来表征^[1]。如:

(1) 缺电概率 *LOLP* (loss of load probability), 给定时间区间内系统不能满足负荷需求的概率。

(2) 缺电时间期望 *LOLE* (loss of load expectation), 给定时间区间内系统不能满足负荷需求的小时或天数的期望值。

(3) 缺电频率 *LOLF* (loss of load frequency), 给定时间区间内系统不能满足负荷需求的次数。

(4) 缺电持续时间 *LOLD* (loss of load duration), 给定时间区间内系统不能满足负荷需求的平均每次持续时间。

(5) 期望缺供电力 *EDNS* (expected demand not supplied), 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力削减的期望数。

(6) 期望缺供电量 *EENS* (expected energy not supplied), 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。

(二) 安全性 (security)

安全性是电力系统在运行中承受例如短路或系统中元件意外退出运行等突然扰动的能力^[1]。

评估电力系统的安全性主要考虑以下几方面:

(1) 系统的扰动情况。系统扰动是多种多样的,各种扰动的严重程度不同,出现概率也是不同的。在电力系统规划/设计和运行中需根据技术经济条件选定某些特定严重程度和出现概率的偶发事件,当系统发生这些适度严重且可信的事件时,系统应能满足规定的安全准则。IEC 名词标准^[59]和某些国外资料称这种事件为可信事件 (credible event)。电力系统通常还规定在更严重的扰动条件下,系统应能保持运行在某种特定状态。

(2) 扰动对系统供电的影响程度。电力系统的安全性体现在下列条件下满足正常运行和供应全部用户的负荷的要求:①系统元件的负载不超出其定额,母线电压和系统频率不超出允许范围;②不会稳定破坏和电压崩溃,以及出现连锁反应。

前者是对系统静态安全的要求,后者是对系统动态安全的要求。这些要求也称为系统安全准则。

我国电力系统在各种扰动时的安全要求参见 1.4.1。

国外电力系统的安全准则参见 1.6.1。

安全性是本书将详细讨论的问题,特别是如何防止大面积停电,下面还将详细讨论。

1.2.2 电力系统稳定性

稳定性是电力系统在扰动(例如功率或阻抗变化)后返回运行平衡状态的能力。

稳定问题是涉及电力系统安全的一个重要的复杂的问题。对电力系统稳定性,长期以来各国一直存在不完全相同的定义和分类。

(一) 我国《电力系统安全稳定导则》中的规定^[2]

DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》规定的稳定分类及定义如下:

(1) 静态稳定:指电力系统受到小扰动后,不发生非周期性失步,自动恢复到初始运行状态的能力。

(2) 暂态稳定:指电力系统受到大扰动后,各同步电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳定运行方式的能力。

(3) 动态稳定:指电力系统受到小的或大的干扰后,在自动调节和控制装置的作用下,保持长过程的运行稳定性的能力。

(4) 电压稳定:指电力系统受到小的或大的干扰后,系统电压能够保持或恢复到允许的范围内,不发生电压崩溃的能力。

(二) IEEE/CIGRE 专题报告^[60]中的规定

IEEE(电气及电子工程师学会)和CIGRE(国际大电网会议)关于稳定名词和定义的联合工作组在2003年提出一个报告《电力系统稳定性的定义和分类》,对电力系统稳定性作了如下的定义和分类:

(1) 稳定性定义:电力系统在给定的初始运行工况下,承受一个物理扰动后返回运行平衡状态的能力,该状态大多数系统变量受约束因而实际上整个系统保持完好。

(2) 稳定性分类:根据导致不稳定模式的物理性质、扰动的大小、须考虑的设备、流程和时间跨度,给出稳定性分类如图1-1所示。

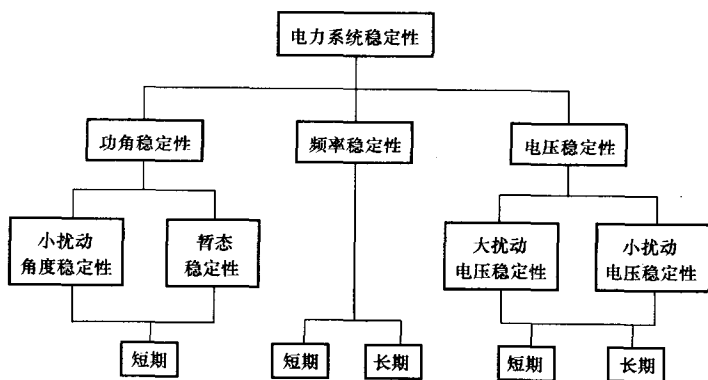


图 1-1 电力系统稳定性分类图

(3) 功角稳定性。功角稳定性是互联电力系统中的同步电机在承受扰动后保持同步运行的能力。它取决于每个同步电机的电磁力矩和机械力矩保持/恢复平衡的能力。同步电机的电磁力矩可分解为两个分量: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。缺乏足够的同步力矩导致非周期不稳定,缺乏阻尼力矩导致振荡不稳定。

小扰动(或小信号)功角稳定性是电力系统在小扰动下保持同步的能力。小扰动稳定问题通常与振荡阻尼不足有关。它的性质可能是局部的,或者是全局的。局部问题通常只涉及个别电厂(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。全局问题是由大型发电机集群间互相作用产生,涉及一个地区机组与另一地区机组间的振荡,它的特性非常复杂并与局部振荡有明显区别。研究小扰动稳定性的时间跨度约为扰动后的 10~20s,可认为是短期现象。

大扰动转子角稳定性或暂态稳定性通常是电力系统承受严重扰动,例如输电线短路,保持同步的能力。暂态稳定性取决于系统初始运行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是第一摆失稳这种形式,而可能与振荡模式重叠,通过几个振荡周期后失稳。研究暂态稳定性的时间跨度约为扰动后的 3~5s,在特大系统并有区间振荡时可能扩展至 10~20s,可认为是短期现象。

名词动态稳定性也为有些系统或文献作为功角稳定性的一类。在北美某些文献中,动态稳定性用于表述有控制装置(特别是发电机励磁控制)的小扰动稳定性以区别于无发电机控制的静态稳定性,在俄罗斯和欧洲某些文献中它用于表述暂态稳定性。因为名词动态稳定性导致很多混淆,IEEE 和 CIGRE 再次不推荐这种应用。

(4) 电压稳定性。电压稳定性是电力系统从一个给定的初始状态承受扰动后保持系统所有母线静态电压的能力。它取决于保持/恢复系统负荷需求和负荷供应两者之间平衡的能力。不稳定可能以某些母线电压持续下降或上升的形式出现。电压不稳定的可能后果是损失一个地区负荷,或者由保护系统使输电线或其他元件跳闸导致连锁反应停运。

电压稳定性也可分为大扰动电压稳定性和小扰动电压稳定性,它们分别表述系统在大扰动(例如系统故障、损失发电机或线路)或小扰动(例如系统负荷的少量变化)后保持静态电压的能力。稳定形式受系统和负荷特性、连续及离散控制和保护的相互作用影响。分析大扰动电压稳定性须考虑系统的非线性特性;分析小扰动电压稳定性在某些时刻可将系统参数线性化,但不能计及诸如电压分接头控制的非线性效应。分析可能需要从几秒至几十分钟,因而可能是短期现象,也可能是长期现象。

(5) 频率稳定性。频率稳定性是电力系统由于发电和负荷显著不平衡导致严重系统故障后保持静态频率的能力。该能力取决于保持/恢复系统发电和负荷的平衡。不稳定可能以频率持续下降或持续摆动引起发电机组或负荷跳闸的形式发生。

互联网故障解列容易造成发电和负荷的严重不平衡,从而使频率大幅度偏移。系统严重故障而形成连锁反应跳闸时,造成系统不可控的无序解列,可能导致频率大幅度波动。频率偏移过程和装置作用的特性时间可以从几分之一秒(对应诸如低频切负荷、发电机控制和保护装置的响应时间)至若干分钟(对应诸如原动机调速器、负荷电压调节器的响应时间)。故频率稳定性可能是短期现象,也可能是长期现象。

1.3 电力系统的扰动和故障

1.3.1 引发系统扰动的因素

扰动在本书中是泛指一切非预期的或可预测的事件,这些事件将对系统产生一定影响,严重时可能导致系统频率、电压或电流偏离额定值或失去稳定性而需采取补救措施。

扰动一般分为不可预测的突发性扰动和可提前预测的扰动两种。电力系统的突然扰动可能是系统外部因素引起,如气象或环境,或者是内部因素引起,如电力设备绝缘损坏。可预

测的扰动发展相对较缓慢,可根据发展过程中出现的某些征兆实现预测。

(一) 气候和环境条件

一般条件下,发电厂和系统的设计准则应考虑环境气象条件,例如:绝缘水平的选择要考虑环境的污秽等级;导线截面的热定额要考虑周围环境温度、风和太阳辐射情况等。然而,气象仍然是设备故障的主要原因之一。根据20世纪80年代在世界范围内若干年的调查统计,表明约20%的故障是由气候条件引起,高于其他原因。

气候可能通过下述途径对供电产生问题:由于冰雪负荷使架空线的导线断裂或连接点断开,造成断线和接地故障;由于风和冰雪脱落使架空线的导线摆动碰撞;由于导线冰雪负荷,加上强风恶劣条件造成架空线杆塔故障,有时可能影响一串杆塔;由于凝露、冻雾、雷电引起污染绝缘子表面漏电造成架空线或室外变电站绝缘闪络,这种污染可能产生于工业污染或海滩盐尘;由于不利的气候条件导致架空线导体过热,如风速低、环境温度高或者强烈太阳辐射;由于导线过热或冰雪附着引起机械负荷导致架空线导线过度弧垂。

较常发生的由于恶劣环境引起的扰动如:架空线对树闪络;风吹物件(包括风筝)碰架空线引起闪络(通常还接地);土地沉陷影响架空线杆塔并导致导线短路和接地;土地挖掘或沉陷损坏电缆;由于森林火灾等引起的烟火产物风吹掠过架空线导致短路。

此外,还有些出现概率较低但潜在危害严重的环境因素,如地震、洪水、龙卷风、地磁暴等。

(二) 电力设备故障

设备故障是引发系统故障的常见形式,除了上述气候环境引起的电力设备故障外,电力设备本身的电气性能(如绝缘击穿、回路断开或短路)和机械性能也可能出现故障或失效。特别是某些复杂的设备是由很多部件构成,如发电设备包括很多工艺系统和辅机,任一部件故障,就可能使发电设备整个退出运行。发电设备的裕度是全系统共用的,一个发电设备失效将影响整个系统。

(三) 供需平衡破坏

负荷或发电容量的突变导致两者不平衡可由许多原因引起:失去外部系统或低压系统的输入或输出途径;输电线路跳闸后解列的系统具有多余发电或负荷容量等。一般说来,这种形式的扰动对系统持续运行是危险的,而且也是经常发生的。

(四) 人为错误

电业职工的人为错误可能发生于电力生产的各个阶段,如规划设计、设备生产、设备安装、运行和维护试验。一般群众可能是不小心介入(如放风筝),也可能是有意介入(如爬杆、非法进入变电站、甚至破坏电力设施)。

电业职工人为错误的常见形式一种是决策或执行中的操作错误,还有一种是继电保护的有关错误。前者的后果通常会立即暴露,而后者可能在几个月或几年后才显露出来。继电保护的有关错误可能从选型不当直到安装、整定计算、现场整定和试验。现场试验可能发现不了选型不当和整定不准确,到电网出现事故时才发现保护不能准确发挥作用,而是拒动或误动,以致扩大事故。

电力系统中还有某些扰动在发展过程中可通过其出现的征兆进行预测,如处理不当或由于某些原因不能及时处理,就可能引发系统故障。例如:电力设备容量短缺,煤、油、天然气等燃料短缺,辅助设施或物料短缺,以及专业技术人员短缺等。

1.3.2 系统扰动的严重性

(一) 系统扰动分类

(1) 按扰动大小分类。在分析系统的工况时，经常采用小扰动和大扰动的分法。小扰动是电力系统不可避免经常存在的，如经常的负荷波动和某些自动调节装置的作用。这种小扰动一般不会直接影响系统的供电功能而成为故障，但由于电力系统是一个复杂的动态系统，小扰动通过系统的动态作用，可能会形成对系统影响巨大的振荡。大扰动一般指将可能影响系统功能的严重扰动。当大扰动导致电力设备和系统不能实现预期的功能时，也称为故障。因此，有时也用大扰动与故障描述同一偶发事件。

(2) 按扰动涉及的范围分类。各种扰动涉及的范围是不同的，有些是系统构成元件直接故障，有些是运行工况或设备故障后果导致的系统效应。

系统元件的直接故障如：架空或电缆线路的短路、断线或接地故障，变电站高压设备短路或接地故障，发电机和变压器等主设备的外部或内部短路和绝缘损坏，其他辅助设备损坏，保护装置及其通信设备误动或拒动，以及系统运行参数严重偏离额定值等。

扰动可能或大或小引起系统故障效应如：过负荷甚至连锁反应，电压越限甚至不稳定，频率越限甚至不稳定，以及系统解列为若干孤立部分等。

(二) 系统扰动时域分布

系统扰动的时域分布范围很广，参见图 1-2。

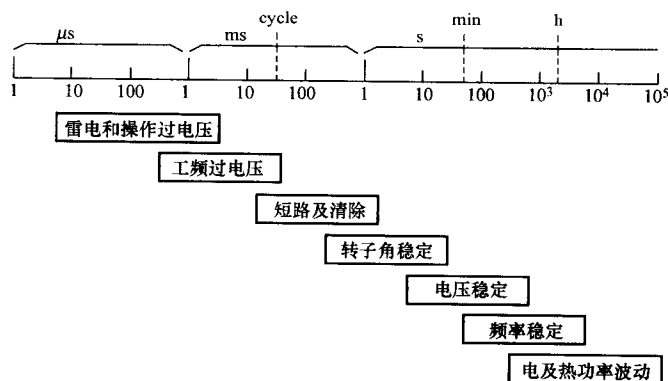


图 1-2 系统扰动时域分布图

本书着重讨论的对象是系统中的短路和稳定问题，包括功角、电压及频率的稳定。

雷电过电压、操作过电压及工频过电压的电磁暂态过程及对策属于高电压技术专业的领域，本书不准备详细讨论。但工频过电压引起的系统某些暂态问题，仍需要由保护和控制设施来处理。

(三) 系统扰动的严重性

(1) 单一故障和多重故障。系统故障按严重程度可分为单一故障和多重故障。单一故障发生的概率是较大的，如系统中一个元件故障切除，由于系统一般设有完善的保护措施，对系统的危害有限。但严重的单一故障也可能对系统产生较大危害，如系统稳定破坏以致解列。多重故障发生的概率较低，但由于单一外部事件引起的相关多重故障还是较容易发生的，例如设备故障又加上保护装置误动，通常这类故障可能对系统造成严重后果。

作为电力系统规划设计准则的适度可信事件在不同国家的不同系统是不完全一样的,它可能根据国家的经济条件、电网的结构、负荷的重要性而有所不同。

当前世界各国多数系统的安全准则采用 $N-1$ 准则,即考虑发生概率较大的单一故障时,如一条线路故障跳闸或一个设备故障跳闸,系统应仍能满足安全准则。但也有些系统,特别是具有极重要负荷的系统,采用更严格的准则,如 $N-2$ 。即同时(或短时)发生两个故障,系统仍应满足规定的安全准则。

CIGRE 20 世纪 90 年代末期在全球范围的一次调查表明^[67]:

- 1) 采用 $N-1$ 准则的为 30 个系统(公司);
- 2) 采用 $N-1$ 有时也采用 $N-2$ 准则的有 12 个系统(公司);
- 3) 采用 $N-2$ 准则的有两个系统(公司)。

同时考虑 $N-1$ 和 $N-2$ 准则的事例如:

- 1) $N-1$ 时无停运, $N-2$ 时无大的停运;
- 2) 考虑同杆双回线故障;
- 3) $N-2$ 准则用于重要的骨干电网或关键联络线;
- 4) 一条线路三相短路,同时另一条单相接地;
- 5) $N-2$ 用于重要负荷区域,而 $N-1$ 用于其他区域,等等。

(2) 系统扰动的影响程度。世界各国广泛采用 CIGRE SC39 定义的评价扰动影响的指标^{[68][79]},可表示为扰动损失的电能($\text{MW} \times 60\text{min}$)除以系统峰值负荷(MW),即“系统·min”。扰动影响严重性分级见表 1-1。

表 1-1 扰动影响严重性分级

严重程度分级	严重性 (系统·min)	表 述	说 明
0	<1	可接受的	正常情况
1	1~10	不严重	影响部分用户
2	10~100	严重	严重影响所有用户
3	100~1000	很严重	非常严重影响所有用户
4	>1000	灾难	极端影响全系统;系统崩溃、停电

1.3.3 系统大扰动分类

电力系统在运行中可能发生的故障(或大扰动)情况差异很大,从简单的个别元件故障,直到可能造成大面积停电严重后果的极端严重故障。对这些故障不可能一视同仁,统一解决。而应根据其可能的出现概率和后果,采取不同的对策和保证系统必要的安全水平。例如系统中某个元件故障,首先应由继电保护快速切除该元件,再根据情况消除该元件对系统的影响,采取适当措施防止故障扩大。对系统处于各种运行及故障状态中,出现各种不同严重程度故障时,应分别提出不同的安全稳定要求。

DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》^[2]将大扰动严重程度分为三类,并提出相应的安全稳定要求。这些扰动分别如下:

(1) 第一类——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,任一回线单相永久接地故障重合不成功及无故障