

电力系统调度控制技术

Dispatch and Control Technology of Power System

王信杰 朱永胜 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

电力系统调度控制技术

王信杰 朱永胜 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书根据实际调度运行情况,从整体上对发电、输电、变电各环节中调度运行相关的知识和业务进行了梳理。主要包括电网及发电厂的基本概念、继电保护的'动作逻辑、电网或者设备异常情况的处理方法、线路设备以及继电保护更换后的特殊送电技术、直流运行的基本知识、电力系统的在线安全分析、电力市场等内容。

本书可供电网公司以及发电厂电气工程、电力系统运行管理及相关技术人员使用,也可以作为电气工程领域相关专业高校师生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统调度控制技术 / 王信杰, 朱永胜编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2022. 1

ISBN 978-7-5635-6575-7

I. ①电… II. ①王… ②朱… III. ①电力系统调度 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 247856 号

策划编辑: 刘纳新 姚 顺

责任编辑: 满志文

封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 唐山玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17

字 数: 356 千字

版 次: 2022 年 1 月第 1 版

印 次: 2022 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6575-7

定价: 48.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

在我国不断落实与推进 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和等生态文明建设目标和相关政策,以及电网规模及调控业务迅速发展和大运行体系建设不断深化的大背景下,本书作者以丰富的工作经验和扎实的理论知识为基础,从实际调度运行情况出发,深入探讨新形势下电力系统调度控制相关技术。

本书前半部分主要介绍电网及发电厂的基本概念、继电保护的動作逻辑、电网或者设备异常情况的处理方法、线路设备以及继电保护更换后的特殊送电技术等内容;后半部分主要介绍了直流运行的基本知识、电力系统的在线安全分析、电力市场等内容。本书力求以结构化的思路,从整体上对发电、输电、变电各环节中调度运行相关的知识和业务进行梳理,旨在提高电网运行人员的理论和技术水平,形成构建新型电力系统和推动能源电力转型的强大合力。

本书由国网河南省电力公司调度控制中心王信杰高级工程师和中原工学院朱永胜博士编著。其中,第 2、3 章由王信杰编写,第 1、4、5、6 章由朱永胜编写,第 7 章由王信杰编写,高峰、李晓柯、刘哲、王露醇对第 7 章的内容做出了贡献,全书由王信杰统稿。

借本书出版之际,向对在本书撰写过程中给予帮助和支持的有关领导和专家表示衷心的感谢;此外,本书的出版得到国家自然科学基金项目(61873292)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2018GGJS104)的资助,在此一并致谢。

由于作者的经验和水平有限,书中的不足之处在所难免,欢迎广大读者及有关专家批评指正。

作 者

2021 年 7 月

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 有功与无功的概念	1
1.1.1 有功与无功的区别	1
1.1.2 定子电流与无功电流	2
1.1.3 励磁调节器	2
1.2 电力系统稳定的概念	3
1.2.1 电力系统安全稳定概述	3
1.2.2 电力系统稳定的分类	4
1.2.3 提高电力系统稳定水平的措施	5
1.3 燃煤火力发电厂生产流程	6
1.3.1 燃煤火力发电厂的电能生产过程	7
1.3.2 锅炉及辅助设备	7
1.3.3 发电厂重要系统相关流程	9
1.3.4 汽机相关流程图	10
1.4 常见的停机停炉的条件及其机组启停流程	12
1.4.1 紧急停炉条件	12
1.4.2 紧急停机条件	13
1.4.3 机组计划启动并网操作流程	14
1.4.4 机组计划停运操作流程	14
1.5 发电机失磁	15
1.5.1 发电机失磁概念	15
1.5.2 发电机的励磁方式	15
1.5.3 发电机失磁的原因	15
1.5.4 发电机失磁运行的现象	16
1.5.5 发电机失磁对发电机和系统的危害	17

1.5.6	允许发电机失磁运行的条件	18
1.5.7	发电机失磁的处理	19
1.6	发电机进相	20
1.6.1	相位相序及发电机进相运行的概念	20
1.6.2	发电机进相运行的影响	20
1.6.3	发电机进相运行规定	21
1.7	电网断面及电磁环网	22
1.7.1	电网断面的概念	22
1.7.2	常见的断面的基本分类	22
1.7.3	影响输电线路输送功率的因素	23
1.7.4	电磁环网的概念	23
1.7.5	电磁环网的弊端	23
1.7.6	电磁环网存在的原因	24
1.8	电力系统过电压	24
1.8.1	大气过电压	24
1.8.2	工频过电压	24
1.8.3	操作过电压	25
1.8.4	谐振过电压	26
1.9	电网三道防线	26
1.9.1	我国电力系统稳定行业标准	26
1.9.2	电力系统的静态稳定储备标准	27
1.9.3	电网的三道防线	27
1.9.4	省网第二道防线关注点	29
1.9.5	省网内第三道防线情况	30
1.10	励磁涌流	31
1.10.1	铁磁材料的剩磁特性	31
1.10.2	励磁涌流的定义	32
1.10.3	励磁涌流的大小	32
1.10.4	励磁涌流的主要危害	33
1.10.5	应对励磁涌流的措施	33
1.11	合解环与并列操作	34
1.11.1	并列的定义	34

1.11.2	发电机的并列和解列	35
1.11.3	电网的合解环操作	36
1.11.4	解环操作注意事项	37
第 2 章	继电保护	38
2.1	变电站主要设备关系和继电保护的基本要求	38
2.1.1	变电站主要设备之间的联系	38
2.1.2	继电保护的基本概念	38
2.1.3	继电保护配置的基本要求	40
2.1.4	调控规程对继电保护的基本要求	40
2.1.5	继电保护通用规定	41
2.2	线路保护的分类及运行中的注意事项	41
2.2.1	线路纵联保护分类	41
2.2.2	线路两套同型号、同类型(原理)的保护命名	42
2.2.3	线路保护运行中的注意事项	43
2.2.4	省网常见的线路保护型号	44
2.2.5	短延时定值	45
2.3	纵联保护的基本概念	46
2.3.1	什么是纵联保护	46
2.3.2	通信通道	47
2.3.3	高频信号的性质	48
2.4	闭锁式纵联保护	50
2.4.1	基本原理	50
2.4.2	保护动作过程	51
2.4.3	方向元件与启动元件的要求	52
2.4.4	收到 8 ms 高频信号后才能停信的原因	53
2.5	光纤纵联保护	54
2.5.1	基本原理	54
2.5.2	产生不平衡电流的因素	55
2.5.3	CT 断线的问题	56
2.5.4	允许式保护的基本原理	57
2.6	母差保护及运行注意事项	58

2.6.1	母线保护的划分范围	58
2.6.2	母差保护识别方式及母差保护的方式	60
2.6.3	母差保护运行注意事项	61
2.6.4	关于新设备启动中母差保护投退相关问题	62
2.7	母联开关过流保护及死区保护	63
2.7.1	母联开关过流保护的运行规定	63
2.7.2	母联开关充电保护、过流保护使用	64
2.7.3	母差保护的死区问题	65
2.8	线路重合闸的基本要求及注意事项	66
2.8.1	线路重合闸的分类	67
2.8.2	重合闸的启动方式、动作条件	68
2.8.3	重合闸的检无压与检同期方式	68
2.8.4	自动重合闸运行中基本要求	69
2.8.5	线路重合闸装置的组成元件	71
2.8.6	线路重合闸装置的动作时限	71
2.8.7	省网自动重合闸装置的一般使用原则	72
2.9	220 kV 失灵保护	72
2.9.1	失灵保护的概念	73
2.9.2	断路器失灵动作的条件	73
2.9.3	断路器失灵保护的基本构成及作用	74
2.9.4	220 kV 断路器失灵保护功能	74
2.9.5	220 kV 断路器失灵保护功能与 500 kV 断路器失灵保护的差别	78
2.9.6	断路器失灵保护配置原则	79
2.9.7	断路器失灵保护异常的处理原则	79
2.10	远跳保护及功能	79
2.10.1	装设远跳保护功能的原因	80
2.10.2	远跳的概念	80
2.10.3	远跳动作原理	81
2.10.4	母线、失灵保护启动远跳的问题	82
2.10.5	远跳逻辑加入增加启动判据	84
2.11	弱馈保护	85
2.11.1	弱馈保护原理	85

2.11.2	弱馈保护动作逻辑	86
2.11.3	正常方式下弱馈投入影响分析	86
2.11.4	联络线路转馈线运行时运行规定	87
第 3 章	异常及故障处理	89
3.1	故障处理的概述	89
3.1.1	电力系统事故等级与分类	89
3.1.2	故障处理的基本原则	90
3.1.3	故障处理的一般顺序	91
3.1.4	故障后的调整措施	91
3.2	母线失压故障处理	92
3.2.1	母线失压的原因	93
3.2.2	母线失压的事故象征	95
3.2.3	母线失压的事故处理	96
3.2.4	母线失压的一般处理原则	97
3.3	局部电网解列故障处理	98
3.3.1	局部电网解列后应考虑的主要问题	99
3.3.2	孤网运行处理原则	99
3.3.3	解列后孤网运行的注意事项	99
3.3.4	调规对解列后的相关规定	100
3.4	电压异常的处理	101
3.4.1	电压异常的标准	101
3.4.2	电压异常的原因及危害	102
3.4.3	电压异常处理的方法	102
3.5	频率异常的处理	104
3.5.1	频率异常的标准	104
3.5.2	频率异常的原因及危害	104
3.5.3	低频率运行对电力系统的危害	105
3.5.4	频率异常处理的方法	106
3.6	异步振荡及同步振荡	108
3.6.1	异步振荡及同步振荡概念	108
3.6.2	异步振荡的现象	109

3.6.3	发电机振荡的原因	109
3.6.4	处理原则	110
3.6.5	什么是低频振荡?	111
3.7	断路器及隔离开关异常处理	111
3.7.1	断路器分类及异常处理	111
3.7.2	隔离开关分类及异常处理	113
3.7.3	断路器非全相运行处理	114
3.8	直流系统故障处理	116
3.8.1	直流系统的结构	116
3.8.2	直流系统接地的原因	117
3.8.3	变电站直流系统接地的危害	117
3.8.4	直流运行监视注意事项	118
3.8.5	直流接地故障的处理方法	119
3.8.6	查找直流接地故障时的注意事项	120
3.9	线路异常及故障的处理	120
3.9.1	线路异常、故障的种类及其原因	121
3.9.2	线路异常或故障对电网运行的影响	122
3.9.3	线路异常及故障的处理基本原则	123
3.9.4	故障线路试送电的基本原则	124
第4章	新设备	127
4.1	新设备投运前的准备工作	127
4.1.1	新设备接入系统的调度管理规定	127
4.1.2	新设备启动必备条件	129
4.1.3	送电前准备工作	129
4.1.4	新线路启动试运行的注意事项	130
4.2	电力设备操作的注意事项	131
4.2.1	电网设备停运对电网的影响	131
4.2.2	线路停送电操作需要注意的问题	131
4.2.3	母线操作需要注意的问题	132
4.2.4	机组操作需要注意的问题	133
4.2.5	新设备送电操作需要注意的问题	133

4.2.6	其他操作需要注意的问题	134
4.2.7	操作条件及目的	135
4.3	开关更换后试送电	135
4.3.1	常见的对新设备送电的方法	135
4.3.2	线路开关后的送电	136
4.3.3	母联开关更换后常见的送电	138
4.4	220 千伏 CT、保护及端子箱更换后送电	140
4.4.1	CT 更换后的试送电检验的内容	140
4.4.2	线路 CT 更换后送电步骤	141
4.4.3	线路 CT 典型试送电操作票	142
4.4.4	母联 CT 或者端子箱更换后常见的送电步骤	142
4.4.5	母联开关更换后常见的送电步骤	143
4.4.6	220 千伏母联 CT 典型试送电操作票	143
4.4.7	开关、CT 更换小结及注意问题	144
4.5	220 千伏新建线路的试送电	145
4.5.1	一般线路试送电三个时间阶段	145
4.5.2	一般新建线路送电步骤	146
4.5.3	一般新建线路典型试送电操作票	146
4.5.4	带有发电机组的单元接线的试送电	147
4.5.5	带有发电机组单元接线新建线路典型试送电操作票	148
第 5 章	直流运行	150
5.1	直流输电运行的特点	150
5.1.1	直流输电的特点	151
5.1.2	直流输电系统分类	152
5.1.3	换相失败	152
5.2	直流输电的运行方式	154
5.2.1	常规换流站的运行方式	154
5.2.2	背靠背换流站的运行方式	158
5.2.3	特高压直流换流站的运行方式	159
5.3	直流输电的一次设备	163
5.3.1	换流变压器	163

5.3.2	换流阀	166
5.3.3	换流器	169
5.3.4	平波电抗器	170
5.3.5	直流断路器	172
5.3.6	交流滤波器	173
5.3.7	直流滤波器	173
5.3.8	直流线路	175
5.3.9	直流感地极	175
5.4	直流输电的二次设备	179
5.4.1	直流控制保护基本结构和配置	179
5.4.2	直流控制	181
5.4.3	直流保护	183
5.5	直流输电的阀冷系统及阀厅空调系统	187
5.5.1	换流阀冷却系统	187
5.5.2	阀厅空调系统	191
第 6 章	在线安全分析	192
6.1	电力系统安全分析概念	192
6.1.1	现代电网对电力系统稳定性的要求提高	192
6.1.2	特高压互联电网的稳定性要求	193
6.1.3	电力系统安全分析的研究内容	193
6.1.4	传统离线计算不满足现代电网的需求	194
6.2	电力系统安全稳定算法	196
6.2.1	潮流计算	196
6.2.2	静态安全分析	197
6.2.3	短路电流计算	197
6.2.4	小干扰稳定计算	198
6.2.5	电压稳定计算	199
6.2.6	静态稳定计算	200
6.2.7	暂态稳定计算	200
6.2.8	中长期稳定计算	201
6.3	电力系统在线安全分析的主要内容	202

6.3.1	在线安全稳定分析及辅助决策系统	202
6.3.2	在线数据整合及维护	203
6.3.3	在线静态安全分析	206
6.3.4	在线静态稳定计算	206
6.3.5	在线暂态稳定计算	206
6.3.6	在线电压稳定分析	207
6.3.7	在线小干扰稳定分析	207
6.3.8	在线短路电流分析	208
6.3.9	在线稳定裕度评估	209
6.3.10	在线预防控制的综合辅助决策	209
6.3.11	紧急状态辅助决策	211
6.4	在线安全分析实用化案例	211
6.4.1	案例背景	212
6.4.2	事件起因	212
6.4.3	数据准备与方式调整	214
6.4.4	安全校核与风险评估	214
6.4.5	主要校核结论	216
第 7 章	电力市场	217
7.1	国外电力市场发展及典型模式	217
7.1.1	国外电力体制改革的推进	217
7.1.2	国外电力市场的典型模式	222
7.1.3	国外电力市场经验小结	228
7.2	电力市场基本原理与出清机制设计	230
7.2.1	电力市场的基本原理	230
7.2.2	电力市场的出清机制	234
7.3	国内电力市场改革现状及趋势	247
7.3.1	国内电力体制改革的进程	247
7.3.2	新一轮电力体制改革	249
7.3.3	我国电力市场的发展趋势	253
参考文献	255

第 1 章 基本概念

1.1 有功与无功的概念

概述 在电网对用户输电的过程中,电网要提供给负载有功和无功。有功和无功功率是电力系统中重要的概念。

1.1.1 有功与无功的区别

有功功率(P)是指保持设备运转所需要的电功率,也就是将电能转化为其他形式的能量(机械能、光能、热能等)的电功率;而无功功率(Q)是指电气设备中电感、电容等元件工作时建立磁场所需的电功率。

无功功率比较抽象,它主要用于电气设备内电场与磁场的能量交换,在电气设备中建立和维护磁场的功率。它不表现对外做功,由电能转化为磁能,又由磁能转化为电能,周而复始,并无能量损耗。特别指出的是无功功率并不是无用功率,它的用处很大。只是它不直接转化为机械能、热能为外界提供能量,作用却十分重要。

电动机需要建立和维持旋转磁场使转子转动,从而带动机械运动,电动机的转子磁场就是靠从电源取得无功功率建立的。变压器也同样需要无功功率,才能使变压器的一次线圈产生磁场,在二次线圈感应出电压。因此,没有无功功率,电动机就不会转动,变压器也不能变压,交流接触器不会吸合,相当于有功功率传输过程中的“平台”。

电工原理告诉我们,有些电器装置在作能量转换时先得建立一种转换的环境。如:电动机、变压器等要先建立一个磁场才能作能量转换,还有些电器装置是要先建立一个电场才能作能量转换。而建立磁场和电场所需的电能都是无功电能。

我们使用电气设备的时候,除了电炉、白炽灯等依靠发热做功的纯电阻电路以外,还有很多带电容性或电感性的电器。它们与纯阻性的电器有什么区别呢?

在额定的供电条件下,纯阻性的电器从电网吸收的用电功率是一定的且稳定的。容性或感性的电器,除了从电网吸收一定的用电功率外(为了区别另外一种功率的性质,我们称之为有用功,也称为“有功”),还会从电网中吸收一种“它实际不会消耗,但必须要给的一种临时性的占用功率,当电流的方向发生改变时,它又会把这种功率归还,它始终都是这样一来一回地,在做着无用功”,所以这种功率的占用消耗称为“无功”。

有功和无功都是功率的表现方式,只是一个在设备上消耗了,另一个在来回地“拉锯”没有消耗。它们实质性的差别就是相位角度不一样,因此,在测量的原理和结构上没有什么区别,只是抽取电流信号的相位不同。

1.1.2 定子电流与无功电流

定子线圈电流分为有功分量和无功分量;有功和无功的调整归根到底就是改变相应分量。

从物理结构来说,发电机的定子和转子除了是一个原动力的拖动外,其余是完全独立、互不干扰的两部分;发电机的定子是功率源,产生感应电动势、电流,在原动力的拖动下,向外输出交流电的有功,由原动力(油量、气量、风量、水量等)决定有功功率的大小。

发电机的转子是无功源、绕组从外部引入直流电建立磁场,在原动力的拖动下,向外输送交流电的无功,由外部输入(多数用发电机自发的交流电整流而得)的直流电决定无功功率的大小。

从电磁原理来说,转子和定子又是紧密联系的,发电机的有功和无功都是由定子输出的,转子的力矩决定有功功率的大小,转子线圈的直流电流决定无功功率的大小。

有功、无功相量示意图如图 1-1-1 所示。

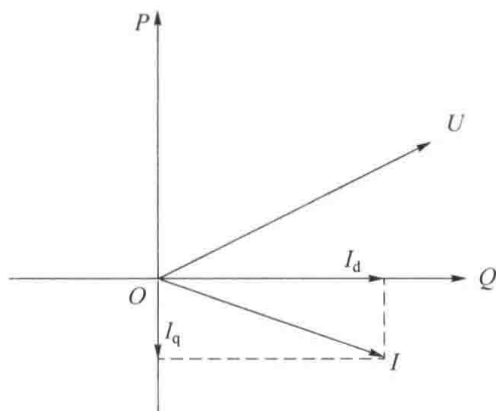


图 1-1-1 有功、无功相量示意图

1.1.3 励磁调节器

利用电枢反应的原理进行分析,如果忽略励磁调节器的话,在《电机学》的同步电动机电枢反应章节中有提到,增加无功,有功不变,增加有功,无功变小。这是因为励磁如果是恒定不变的,那么在增加有功时,励磁用于交轴电枢反应的部分就多了,因为有功功率是靠电动机的交轴电枢反应来实现的,那么用于直轴电枢反应的部分就少了,而无功功率正是由直轴电枢反应来实现的,这样加有功的时候无功就会降低,当然电压也就会适当降低。等于是固定不变就那么多的励磁电流,要么用作交轴反应来实现有功,要么就用作直轴反

应来实现无功,在加有功时,交轴电枢反应用的励磁多了,那么励磁分给直轴电枢反应来实现无功的部分就少了。所以由于电枢反应,增加有功功率会产生去磁作用,最终导致发电机欠磁,无功功率降低,电压降低。

自动励磁调节器(在此只考虑调节器在自动通道恒电压方式下)是以发电机端电压作为被调量的,也就是说励磁调节器的作用就是要维持机端电压不变。所以由上面的分析可知,在机组稳定运行,励磁不变的时候,如果增加有功功率则会使发电机的端电压适当降低,那么此时考虑到励磁调节器的存在,当发电机端电压降低,则会使励磁调节器自动增加励磁来维持机端电压。所以正是由于该调节作用,使得发电机在有功增加时,无功会基本维持不增不减。

发电机在有功增加时会使端电压降低,由于励磁调节器会自动增加励磁维持发电机端电压,正是因为此时调节器自动增磁,则不会出现有功增加,无功明显减少的现象。当然,这时也会有一个新的问题,就是众所周知增加励磁时发电机无功功率会自动增加,那么在增加有功时,励磁也是在自动并且大量增加的,那么无功此时会大量增加吗?这里可以解释一下,电机学的发电机无功功率调节章节中分析调节励磁改变无功的前提是发电机输出有功不变,也就是说增加励磁无功增加的前提是发电机其他条件基本不变的,至少发电机有功是不变的,那么增加的励磁便全部用在了升高电压增大无功上,所以才会有了增加励磁,无功增加的结论。但是在增加有功的情况下大量增加励磁,发电机仍然只是为了维持着机端电压不降低,发电机的端电压只要不变,则说明无功功率的供需是基本平衡的,那么此时认为外界无功用户是基本不变的,发电机此时的无功出力也不会有什么大的变化。

调节有功功率时,励磁调节器只能够基本维持无功不变。也不排除轻微增加或者轻微减少的情况,但可以肯定不会明显增加或者明显减少。电动机本身的特性和机组本身因素励磁调节器作用,也正是这两者起着主导作用。如果忽略外界因素,调节器本身调节作用基本能抵消纯电动机的作用,最终加有功时,无功不变。需要考虑的外界因素则是机组以外的因素分析调节器的影响中系统功率传输机理和厂用电负荷的变化以及人为干预的影响,这三个因素分析的最终结果均为有功增加,无功增加。无功功率基本还是呈现出与有功功率同方向变化的趋势。

1.2 电力系统稳定的概念

概述 本节介绍了电力系统的稳定分类,让大家有一个整体的概念。

1.2.1 电力系统安全稳定概述

保持安全稳定运行是对电力系统最基本的要求。若无法保证安全稳定运行,则电力系统运行的经济性、可靠性和环保效益均无从谈起。正常运行的电力系统中无时无刻不存在

各种大大小小的扰动,例如负荷变化、母线或线路短路、发电机故障解列等。

电力系统稳定是指电力系统受到扰动后保持稳定运行的能力。当电力系统受到扰动后,能自动恢复到原来运行状态或利用控制设备的作用过渡到新的运行状态运行,即为电力系统稳定运行。从狭义上看,电力系统稳定指电力系统经受故障扰动引起的机电电磁暂态过程,过渡到新的可接受的稳态;从广义上看,电力系统稳定问题还包含稳定遭到破坏后,电力系统进入非同步运行的状态,之后在新的条件下实现再同步的一系列过程。电力系统功角稳定数学模型图如图 1-2-1 所示,电力系统功角稳定示意图如图 1-2-2 所示。

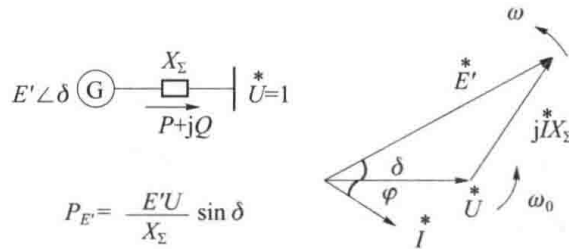


图 1-2-1 电力系统功角稳定数学模型图

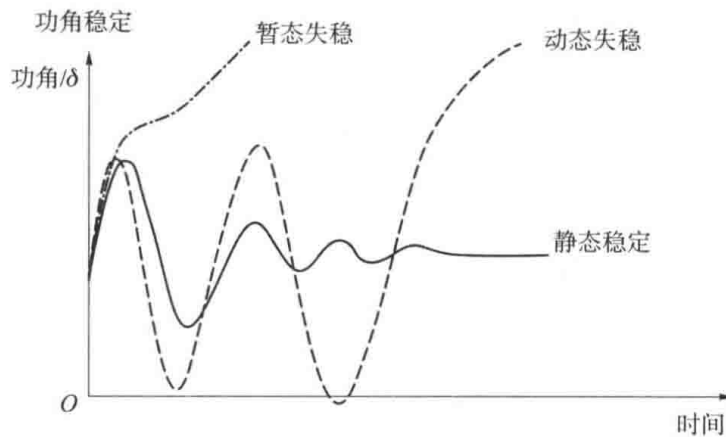


图 1-2-2 电力系统功角稳定示意图

1.2.2 电力系统稳定的分类

在工程实践中,为便于建模和分析,并以一定的标准评价和提高电力系统稳定运行的能力。从广义上来看稳定可分为:

- (1) 发电机同步运行的稳定性问题,根据电力系统所承受的扰动大小不同,可分为静态稳定、暂态稳定、动态稳定三大类;
- (2) 电力系统无功不足引起的电压稳定问题;
- (3) 电力系统有功不足引起的频率稳定问题。

三大类稳定问题又可根据故障严重程度、研究时间尺度和长度、系统动态行为表现等继续细分。电力系统稳定的分类及失稳表现如表 1-2-1 所示。