

电力系统的安全性和稳定性

余贻鑫 陈礼义 编著

内 容 简 介

本书介绍电力系统安全性和稳定性方面的一些较新的知识和研究专题。全书分为两部分。第一部分(第一至第三章)主要介绍与稳态运行情况计算机辅助安全性调度有关的专题,包括安全性的基本构想、潮流、状态估计、检查与辨识、偶然事故选择、潮流计算外部等值和静态安全性分析等。第二部分(第四至第十章)介绍同动态安全性估计和稳定性计算有关的一些知识,包括电力系统动态过程数学模型、暂态稳定仿真、动态等值、李雅普诺夫直接法在暂态稳定研究和动态偶然事故选择中的应用以及电力系统稳定性和安全性的概率考虑等。

本书可供电力系统专业的大学生和研究生阅读。它还为电力系统的工程技术人员和科研人员提供了一些新的研究课题。

电力系统的安全性和稳定性

余贻鑫 陈礼义 编著

责任编辑 范铁夫 张英娥

科学出版社出版

北京朝阳区内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

*

1988年7月第一版 开本:787×1092 1/16

1988年7月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:0001—3,174 字数:508,000

ISBN 7-03-000337-3/TM·5

定价:5.70元

前 言

本书介绍与大电力系统计算机辅助安全性调度有关的一些内容。电力系统计算机辅助调度,是近十几年发展起来的新课题,其作用是利用计算机辅助电力系统调度人员进行调度,以保证安全而又经济地满足负荷需求。而电力系统的动态安全性估计,又是同电力系统稳定性的分析密切相关的,因此我们把两者结合起来介绍。

全书分为两部分。第一部分主要介绍在稳态情况下与计算机辅助安全性调度有关的知识。其中除静态安全域的解析方法外,许多功能已在电力系统控制中心实现。第二部分介绍同动态安全性估计和稳定性计算有关的知识。其中有些内容(如使用能量函数法的暂态稳定分析)近年来发展较快,接近实用;有些(如稳定性和安全性估计中的概率考虑)则还处于开拓阶段。

本书反映了电力系统安全性和稳定性科学发展的现状,它是有关大系统的现代数学理论同计算机方法相结合的产物,对于新一代的电力系统工程技术人员和管理人员来说,这些知识是必不可少的。这个领域所剩下的问题,在理论上难度很大,是个还远没有充分研究和开发的领域。可以说这个领域中的一些问题向数学提出了挑战,而这些问题不解决,电力系统就难以实现安全运行。

该书是本人1980—1982年在美国加利福尼亚大学(伯克莱)电机与计算机科学系进修的成果之一;衷心感谢 Felix F. Wu 教授引导本人进入电力系统安全性分析这个崭新的领域。本人回国后,在1983年上半年,以进修笔记为提纲,并参阅了最近几年的有关论文和报告,其中也包括本人的工作,为天津大学电力系统及其自动化专业的研究生开设了这门课程,这些讲课的手稿就成了本书的雏型。本书第六章、第八章和第九章9.1—9.3节、9.7节是由陈礼义副教授写的。黄纯华、梁统珍、杨卫和冯飞等同志为促成本书的早日出版做了大量工作,在编写过程中还得到了 Felix F. Wu 教授、孙绍先教授和杨以涵教授鼓励,以及贺家李教授和王文昭系主任等的支持,仅此一并致谢。限于编著者水平,书中一定有不少疏漏与错误,希望得到读者的批评指正。

余贻鑫

一九八五年十月于天津

目 录

前言	i
常用符号	ix
第一章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 电力系统调度	2
1.2.1 成本	2
1.2.2 安全性	3
1.2.3 排出物	4
1.2.4 问题的处理方法	5
第二章 电力系统稳态分析的变量与约束	7
2.1 潮流复习	7
2.1.1 潮流方程	7
2.1.2 潮流问题的处理方法与解题步骤	10
2.1.3 潮流方程的解法	11
2.1.4 解耦潮流方程	13
2.2 电力系统调度中的决策变量、依从变量和外部变量	14
2.3 约束和可行域	15
第三章 安全监视和安全性分析	17
3.1 引言	17
3.2 电力系统的静态状态估计	18
3.2.1 问题的定义	18
3.2.2 假想模型	20
3.2.3 状态估计法	21
3.2.4 电力系统状态估计中坏数据的检查	24
3.2.5 坏数据与错误结构辨识	28
3.3 偶然事故选择	30
3.3.1 行为指标	31
3.3.2 偶然情况下行为指标的评估	31
3.4 外部等值	34
3.4.1 Ward 简化	35
3.4.2 解耦 Ward 简化	36
3.4.3 扩展 Ward 简化	37
3.4.4 REI 简化	38
3.5 稳态情况下的安全性分析	41
3.5.1 公式描述	41
3.5.2 安全性约束	43

3.5.3	稳态安全分析问题的描述	46
3.5.4	解耦无功潮流方程安全解的存在性	46
3.5.5	解耦有功潮流方程安全解的存在性	48
3.5.6	潮流方程安全解的存在性	51
3.5.7	例	53
3.5.8	小结	54
第四章	同步发电机及其励磁与调速系统模型	55
4.1	引言	55
4.2	同步电机数学模型	55
4.2.1	同步电机的电路模型	55
4.2.2	摇摆方程	61
4.2.3	同步电机的几个典型的数学模型	63
4.3	励磁系统模型	75
4.3.1	引言	75
4.3.2	发电机端电压变送器和负载补偿器模型	76
4.3.3	基本的励磁系统图	77
4.3.4	旋转直流励磁机的数学模型	84
4.3.5	整流器的调整特性	89
4.3.6	电力系统稳定器	90
4.4	原动机及其调速系统模型	93
4.4.1	引言	93
4.4.2	水轮机调速系统数学模型	93
4.4.3	汽轮机调速系统数学模型	98
4.4.4	水轮机数学模型	101
4.4.5	汽轮机数学模型	103
第五章	电力系统动态分析的联立隐式法	107
5.1	引言	107
5.2	暂态稳定问题的数学描述	108
5.3	算法格式	110
5.4	联立隐式法	110
5.4.1	系统矩阵	110
5.4.2	评价积分算法的准则	111
5.4.3	差分方程	112
5.4.4	数值稳定性	113
5.4.5	梯形法则	114
5.4.6	隐式中点 (IMP) 法则	114
5.4.7	APS 法	114
5.4.8	积分步长的选取	115
5.4.9	几种隐式方法的比较	117
5.5	代数求解	117
5.5.1	稀疏线性代数方程的求解	119
5.5.2	迭代技术	119

5.5.3	收敛判据	120
5.5.4	迭代初值的预测	120
5.6	隐式梯形积分法同几种显式积分法所需 CPU 时间的比较	122
第六章	电力系统的动态仿真	123
6.1	引言	123
6.2	电力系统动态响应计算的模型	124
6.2.1	同步电机模型	124
6.2.2	输电网络模型	124
6.2.3	电力系统模型的一般形式	125
6.3	数值计算综述	125
6.3.1	数值计算的要求	125
6.3.2	数值积分方法	126
6.3.3	解的误差	126
6.3.4	数值积分方法的稳定性	127
6.3.5	刚性方程问题	128
6.4	动态响应数值计算的分类	130
6.4.1	分割求解法	130
6.4.2	联立求解法	130
6.5	分割法的交接问题	130
6.5.1	显式积分法	131
6.5.2	用迭代法的严格交接	131
6.5.3	用外推法的不严格交接	131
6.6	分割法的求积分问题	132
6.6.1	显式欧拉法	132
6.6.2	显式龙格-库塔法	133
6.6.3	预测-校正方法	133
6.6.4	有误差修正的预测-校正方法	134
6.6.5	隐式多步积分法	135
6.6.6	隐式多步法公式(A-稳定的多步法)	136
6.6.7	微分方程的分块解法	136
6.7	网络模型及其解法	138
6.7.1	网络模型	138
6.7.2	求解网络方程式的主要方法	139
6.7.3	网络模型和选择网络方程式解法的关系	142
6.8	联立求解法	143
6.8.1	引言	143
6.8.2	多步积分法	144
6.8.3	多步积分法中矩阵方程式的解法	144
6.9	问题的综述	146
6.9.1	刚性问题的特殊办法	146
6.9.2	变量的限值问题	147
6.9.3	精度与速度问题	147

6.9.4	误差的自动控制	148
第七章	电力系统动态等值	150
7.1	引言	150
7.2	基于相关的动态等值	150
7.2.1	相关识别	151
7.2.2	网络化简	161
7.2.3	发电机单元动态集合	173
7.3	模态分析动态等值	183
7.3.1	系统响应中的主要模态及基于压缩模态的模型简化	183
7.3.2	模态分析动态等值技术在暂态稳定仿真中的应用	183
7.4	ϵ -相关发电机群的识别	187
7.4.1	引言	187
7.4.2	定义及一些概念	188
7.4.3	数学模型	191
7.4.4	ϵ -相关发电机的识别	195
7.4.5	相关识别的计算过程	197
7.4.6	计算示例	198
第八章	李雅普诺夫稳定性理论及其在电力系统中的应用	200
8.1	引言	200
8.2	系统的数学模型	201
8.3	稳定性与 V 函数的基本定义	202
8.4	李雅普诺夫稳定性的基本定理	204
8.5	线性定常系统的李雅普诺夫函数	208
8.6	非线性系统的李雅普诺夫函数	209
8.6.1	初积分法	210
8.6.2	二次型法	210
8.6.3	变量梯度法	211
8.6.4	祖波夫法	213
8.6.5	波波夫法	216
8.7	电力系统暂态稳定性分析中的李雅普诺夫函数	220
8.7.1	引言	220
8.7.2	单机系统的数学模型	221
8.7.3	用初积分法构造的李雅普诺夫函数	222
8.7.4	变量梯度法的应用	224
8.7.5	祖波夫法的应用	225
8.7.6	波波夫法的应用	226
8.8	多机电力系统的数学模型	230
8.8.1	数学模型	231
8.8.2	用电机相角做参考坐标的状态空间模型	235
8.8.3	用惯性中心做参考坐标的状态空间模型	236
8.8.4	直流输电线路及负荷表示法	237
8.9	多机系统能量型的李雅普诺夫函数	241

8.10	用多变量波波夫准则构成的李雅普诺夫函数	242
8.10.1	用电机相角为坐标的状态空间模型	243
8.10.2	用惯性中心为坐标的原点状态空间模型	245
8.10.3	用波波夫法构造李雅普诺夫函数	245
第九章	多机电力系统暂态稳定性分析中直接法的应用	253
9.1	引言	253
9.2	电力系统稳定域的计算	253
9.2.1	$V(x)$ 临界值 V_{cr} 的计算	254
9.2.2	不稳定平衡点的近似估计	255
9.3	暂态稳定性研究中的直接法	257
9.3.1	加速度法	257
9.3.2	暂态能量分析法	258
9.3.3	关联不稳定平衡点法	261
9.3.4	势能界面法	263
9.4	应用实例	266
9.4.1	示例用的电力系统	266
9.4.2	临界暂态能量的计算	268
9.4.3	临界清除时间的计算	272
9.4.4	相关不稳定平衡点	273
9.5	使用单个电机能量估计电力系统暂态稳定性	274
9.6	使用暂态能量储备技术的偶然事故分析	275
9.6.1	引言	275
9.6.2	暂态能量储备	275
9.6.3	偶然事故分析方法的特点	276
9.6.4	偶然事故分析的步骤	276
9.6.5	计算过程	277
9.6.6	计算 θ^c 和 ω^c 的简化过程	277
9.6.7	示例	278
9.7	直接法的发展和应用前景	278
第十章	暂态稳定性和动态安全性估计中的概率考虑	281
10.1	引言	281
10.2	暂态稳定性的概率考虑	281
10.2.1	暂态稳定性的概率方面	281
10.2.2	稳定性指标	283
10.2.3	系统示例	284
10.2.4	事故的单一指标	288
10.2.5	网络图形对稳定性指标的影响	288
10.2.6	负荷不确定性的影响	289
10.2.7	负荷模型的影响	290
10.2.8	系统指标	290
10.3	电力系统概率的静态和动态安全性估计	292
10.3.1	引言	292

10.3.2	两层系统模型	293
10.3.3	安全域	293
10.3.4	静态和动态安全性的估计	296
10.3.5	安全转移率	296
10.3.6	到不安全时间的概率分布	297
10.3.7	安全转移概率的计算	299
10.3.8	示例	299
10.3.9	结论	304
附录 A	线性系统理论中的一些概念与命题	305
附录 B	高斯随机变量	327
附录 C	测度空间的基本概念和 Lary-Schauder 不动点定理	331
附录 D	等值同步发电机模型	334
附录 E	数值积分的计算公式	338
参考文献	340

常用符号

本书涉及到大量专用符号。这些符号在各章节及附录中将分别予以说明。下面所给出的仅是贯穿全书的常用符号。

$\mathbf{A}, [L(\theta)]$ \mathbf{x}, \mathbf{u} $\mathbf{0}$ \mathbf{I} \dot{V}, I, \dot{a} \dot{V}^*, \dot{I}^* $(d/dt)\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$ $(\partial/\partial t)\mathbf{x}(\theta, t)$ $\det \mathbf{A}$ $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ $\frac{\partial(y_1, \dots, y_n)}{\partial(x_1, \dots, x_n)}$ $\{x_n\}, X$ $\{x P\}$ Σ $ z $ $ \cdot $ \lim $\hat{F}(s)$ \mathbf{A}^T \mathbf{A}^{-1} $(\mathbf{A})^*$ $\operatorname{Re}(\dot{V})$ $\operatorname{Im}(\dot{V})$ $\exp x, e^x$ \triangleq \blacktriangle \dim	矩阵 向量 零向量或零矩阵 么矩阵 复电压、复电流、复变比 \dot{V}, \dot{I} 的共轭 向量 \mathbf{x} 的一阶导数 \mathbf{x} 对 t 的偏导数 矩阵 \mathbf{A} 的行列式 雅可比矩阵 雅可比矩阵 集合 具有性质 P 的集合 求和 z 的绝对值 范数 极限 函数 $F(s)$ 的拉氏变换, 傅氏变换 矩阵 \mathbf{A} 的转置 矩阵 \mathbf{A} 的逆 矩阵 \mathbf{A} 的共轭转置 复数 \dot{V} 的实部 复数 \dot{V} 的虚部 x 的指数 定义符号 定理证毕 维数
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

第一章 概 述

1.1 引 言

为了弄清楚一个电力事业的电气行为，一种较为方便的做法是把它设想为一个三元组 (S, N, L) ，其中 S 是一组电能源和沟； N 是联结 S 元的网络；而 L 是为了运行 S 和 N 以及规划它们增长的一组战略。在现有电力事业中，源大多是大而集中的同步发电机，沟大多是具有高斯(正态)随机能量需求的分散的负荷。

网络有两部分——跨越相当长距离并输送巨大电力的输电系统和局部送电的配电系统。输电网通过联络线相互联系着，从而使得各区域电力系统间能够相互交换电力，分担储备，并在必要时相互支持。

在某些发达国家，电力系统的操作和运行战略已有了很大发展，全部负荷都必须得到满足，并要求具有很高的可靠性(每年对用户供电的中断低于 10 小时)。因为在电力系统中储能的设施很少，所以一个区域电力系统的净发电量(发电加上跨过联络线流入的电功率)必须紧紧地跟踪它的总负荷。影响这一跟踪的问题包含从毫秒级的快速暂态现象直到今后若干年的规划决策。为了避免一揽子处理整个这个时间间隔，已经以一种分层的方式组织了发展战略和运行战略，它们的某些成分列于表 1.1。假设在较低层上所做的决策对较高层的模拟只有较小的影响，这就允许采用由上到下的设计方法。首先是负荷预测，继之是电源发展规划，然后是输电和配电规划，最后是决定运行策略。

表 1.1 电力系统规划与运行的一些问题

名称	大约 期间	问题的描述与说明
资 源 和 设 备 规 划		
发电规划和成本概算	20 年	在给定负荷需求与燃料价格的预测之后，找出满足负荷(并具有规定裕量)的最小发电追加投资。这个问题是混合整数型的数学规划问题。整型变量相应于发电追加，而连续变量相应于运行决策。已开发了混合整数规划、动态规划和线性规划的方法。
长期燃料规划	20 年	给定发电厂，求燃料价格最低的来源和供货计划。
输电和配电规划	5—15 年	给定了区域的负荷预测和计划追加的发电，寻找所需追加的输电和配电，以便能够经济、可靠并以环境所容许的方式满足负荷的需求。已开发的输电规划手段中包括线性规划法、动态规划法和灵敏度法。

名称	大约期间	问题的描述与说明
运 行 规 划		
检修与生产计划安排	2—5 年	给定负荷预测和为满足负荷可利用的设备, 安排电力公司生产计划和设备正常检修的计划, 目标是在所有时间里维持事先规定的容量裕量, 或者在最小化生产价格下最小化对用户的停电。数学上这个问题已经混合了整型和博奕方面。
燃料计划安排	1 年	为满足电厂的需要, 安排燃料到货与存储, 可使用“运输算法”。
实 时 运 行		
单元启停	8 小时—1 周	给定负荷预测及可利用的发电机, 决定每台机的启、停时间, 目标是能够跟踪负荷、对付随机停机和最小化运行成本, 这是混合整型规划问题。
调度	连续	调度已投入运行的发电机, 使在不危害设备的情况下, 能满足负荷需求, 维持电压和频率在允许范围内, 且成本最小。
自动保护	在零点几秒内	设计保护方式, 以期最小化设备的损坏, 最小化随机停电。

1.2 电力系统调度

在电力系统运行的战略中, 特别是调度, 包含多种需要关注的问题, 如各种计算量很大的仿真, 各种最优化, 大量的数据库和人机对话的图形显示等。事实上在表 1.1 中, 同分层中的任何其他层相比, 调度这一层或许包含有更多的计算机辅助设计 (CAD) 的组成部分, 这就是本书所要重点讨论的问题。

由发电机所发出的电功率, 除一部分作为网损被电网吸收之外, 其余送至负荷或通过联络线送到其他网络。控制这整个电能生产与流动的量是一些变量。这些变量可分为两类, 一类是以较大步长阶跃的离散变量, 另一类是连续变量。我们把为完成对基本上连续的变量进行控制所做的计划安排, 称之为调度。换句话说, 调度所指的是“具有给定发电机组的和给定图形的网络的计划安排”。

在调度中常规的和新出现的问题可分为三类——成本、安全性和排出物。下面我们将分别讨论。

1.2.1 成本

在现有电力系统中主力电厂有三种形式——核电、水电、火(热)电(燃烧煤、石油和天然气)。通常核电厂运行在恒定的出力水平, 水电厂有基本不变的运行成本, 因此由调度支配的成本的主要成分是在火(热)电厂中的燃料。

火(热)电厂的输出功率是由顺序打开通往汽轮机的进气口处的一组阀门来控制的。当每个阀刚打开时, 节流损失大; 而当阀完全打开时, 节流损失小。这样, 电厂的运行如图

1.1 所示。为了调度的目的,这个成本通常用一个或多个两次线段来近似。

1.2.2 安全性

一个电力系统的安全性是指它的设备不过负荷,而且在它的网络上的变量不偏离允许范围的条件下,满足它的负荷的能力。

特别值得关注的是系统的突然改变。其起因可能是内扰(如当一个设备由于过负荷而故障停运)或外扰(如当一个设备被雷击时)。伴随这些改变的是暂态扰动,许多设备可能过负荷或掉闸。当最终的稳态建立起来时,系统可能缺乏发电容量,直到修复之前无法向所有负荷供电。

Dy Liacco^[2] 已提出了用以检验安全性的一个构想。在这个构想中电力系统被看作是处于两组约束下运行的: **负荷约束**和**运行约束**。负荷约束的要求是所有负荷都必须被满足;运行约束则给出了网络运行参数的上限和下限。同时,在该构想中把系统想象为三种状态: **正常状态**、**紧急状态**和**恢复状态**。正常状态指负荷约束与运行约束均被满足的状态;紧急状态指对运行约束有重大破坏的状态;恢复状态指负荷约束被破坏的状态。图 1.2 所示为一个概念性构想。

安全性是相对于一族称之为**下一个偶然事故集合**(简称为 SNC)的随机事件而定义的,这是一个可散发生的扰动的集合。如果一个系统处于正常状态,并且没有任何一个偶然事故会使它转移到紧急状态,则称这个系统是安全的。

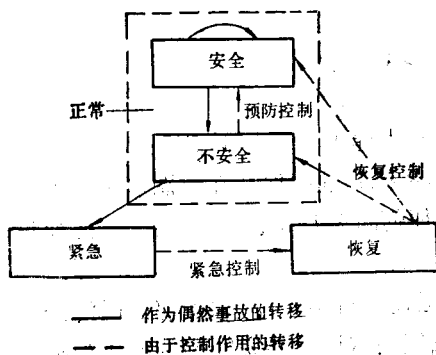


图 1.2 电力系统的运行状态和由于偶然事故及控制作用相结合的状态转移

安全校验这就太长了。因此有另一个较简单的安全性概念,我们称之为**静态安全性量度**,用 SSM 表示,它也定义了一个 0-1 量度。为了估计它,首先要猜测在每个偶然事故下系统会达到的终极图形(终极图形是不知道的,是推测的)。然后针对这个终极图形计算其稳态解,并进行负荷约束和运行约束校验。如果对于整个“下一个偶然事故集”中的每个偶然事故所做的校验全部通过,则系统是安全的(SSM = 1)。一般,这个量度也太复杂了,因而又有安全裕量的安全性量度,用 SMSM 表示。一些常用的裕量如下:

- (1) 旋转备用——已投入电网的机组所具有的还未用上的发电容量;
- (2) 准备好的备用——能在短时间内投入电网的发电容量;
- (3) 母线角度的分散——输电线两端的的角度差(它是线路的未用到容量的一个量度,

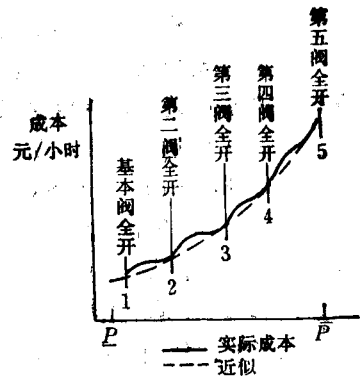


图 1.1 冰电厂发电机的运行成本
P 和 \bar{P} 是出力的下限和上限

也是当一个扰动发生时系统变为不稳定的可能性)；

(4) 设备裕量——其他关键性设备的未用上的容量。

在所有安全性的概念中,它是最简单的,也可用 0-1 变量来表示。如果系统的变量处在规定的裕量之内,则称系统是安全的。

目前 DSM 用于离线研究,而简单的 SSM 和 SMSM 用于实时运行。因为

$$(SMSM = 1) \Rightarrow (SSM = 1) \Rightarrow (DSM = 1) \Rightarrow (SSM = 1) \Rightarrow (SMSM = 1)$$

(其中,符号 \Rightarrow 表示“蕴涵”;而符号 \Rightarrow 表示“不蕴涵”),所以没有一致的方法把这些量度套装在一起。

DSM = 1 是上述三种量度中最有价值的指标,当 DSM = 1 时,系统可以免受扰动的病态影响。然而,这个准则也还不是确定的,原因有两个:首先,不能保证“下一个偶然事故集”会包含所有的重要偶然事故;第二,在计算系统对偶然性的响应时存在着对系统起决定性作用的不确定性。它们来自:

- (1) 缺乏较好的相邻系统的动态等值;
- (2) 运行人员所施加影响的不确定性;
- (3) 保护开断点的不确定性(保护动作改变系统图形);
- (4) 缺乏好的负荷动态模型。

DSM 的另一缺点是:

- (1) 它没有考虑每个偶然事件所发生的概率;
- (2) 它只是二元的,如能给出可更好的表示安全性和不安全性程度的量度将是可取的;
- (3) 它所给出的关于如何改正不安全的信息很少;
- (4) 它要求大量的估计计算。

为了回避昂贵的 DSM 的暂态响应计算,已经有人建议采用如下假设:一旦系统进入了一个图形,并且在此情况下是渐近稳定的,则系统将保持在该图形内而不再出去。但这并不真实,因为在暂态过程中保护可能在任何时刻启动。因此由于一些变量的初始偏离很大,系统会发生向另一个图形的转换。

为了寻求较好的安全性量度,有许多研究工作正在进行中^[4-7]。由于前面已经提到的

理由,我们在这里只能说问题的解决是特别困难的。不设法回避问题的内在复杂性的研究方法是不大可能获得有用的结果的。

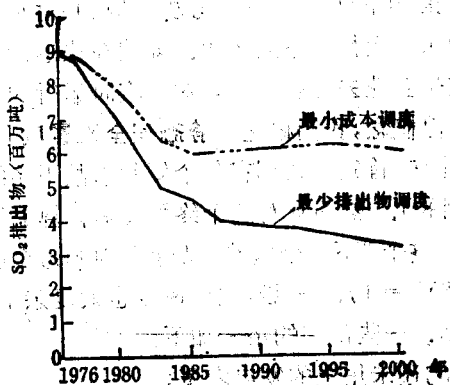


图 1.3 美国俄亥俄河盆地的电力事业排出的 SO₂

1.2.3 排出物

发电厂除发电之外,还产生大量固体废物、渣和污染物。这些将会影响空气和水的质量。为了调度的目的,要特别关注影响空气质量的污染物。它们包括 NO_x, CO₂, SO₂ 和各种硫的氧化物,它们可能传播很远,而且长期有影响(在文献[1]中给出了有关的参考文献)。

许多研究工作者已把排出物包括在调度的程序当中,但除个别情况外,他们的工作基

本上还未被电力工业所采用。但是既然调度能对排出物的处理有显著的影响(例如图 1.3 所示),那么将来可能要这样进行调度。

1.2.4 问题的处理方法

成本、安全性和排出物这三者相互抵触,改善其中之一会损害另一个。在一些发达国家里,现有的规章是限制产生一度电时燃料燃烧的排出物,而不是限制在任何区域里所产生的全部排出物的数量。电力事业满足这些规章的办法是选择燃料和安装控制污染的硬件。仅在高污染的期间里或个别的地方(象美国洛杉矶峡谷)排出物的处理才作为调度的目标。因此调度的目标成了在保持正常和(对一些系统而不是所有系统)安全的情况下寻求最低的成本。这个工作是靠象图 1.4 所示的分散的计算机系统来实现的。能量中心是这种系统最重要的决策部门,它们的功能包括:

(1) 极限校验(在 SMSM 意义上的监控安全性): 使用实时系统测量,校验关键性的变量,看看它们是否处在规定的限度内,从而确定系统是否正常。如果系统处在紧急情况下,则执行功能(6)。如果已丢失负荷则执行功能(7)。每隔几秒钟做一次极限校验。

(2) 安全性分析: 识别下一个偶然事故集(SNC),并在 SSM = 1 的意义上确定系统是否安全。如果系统不安全,则向运行人员发出信号,并不是所有的能量中心都有安全分析程序。在有这种程序的地方每隔 15—30 分钟做一次分析。

(3) 经典的经济调度: 对已投入运行的发电机进行计算,以期达到最低的成本,并满足目前的负荷要求。在做这些计算时,假设负荷保持不变。但由于实际负荷不是不变的,所以每隔 1—5 分钟要重复计算一次。为了使负荷呈现为准静态的,这样的时间间隔是足够小的。

(4) 自动发电控制(AGC): 其输出信号加到发电机上,以便增加或减小发电机的输出功率来维持频率和满足与相邻系统间的功率交换计划。在 2—4 秒的间隔里做一次。

(5) 预防性调度: 如果系统不安全,要给予处理,使之恢复安全。一些系统的能量中心有这样的程序;当运行人员调用它的时候,它就能产生调度以消除那些超出极限的变量。然而,目前大部分预防性控制还是由运行人员决策的。

(6) 紧急控制: 采用校正性的动作,以使系统正常。目前,除去按事先计算好的调度表或由低频继电器作用的甩负荷之外,通常是运行人员对全部紧急控制负责。

(7) 恢复性控制: 恢复系统负荷的控制。目前,所有恢复性的决策都是由运行人员做出的。

功能(3)和(4)与经济调度有关。经济调度问题超出了本书的范围,本书重点讨论安全监控和分析。在有功能(1)—(4)的控制中心里,这些功能是完全自动的;而功能

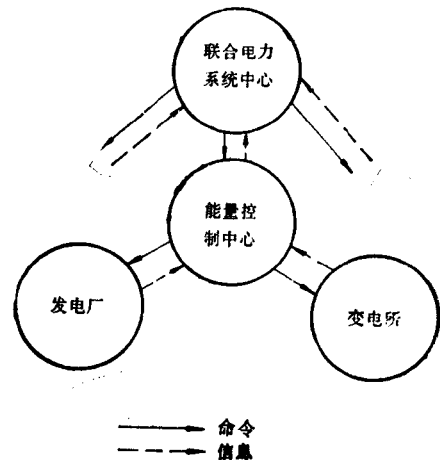


图 1.4 分层控制

大多数区域电力系统在做决策时保持自给自足,然而,有一些接入联合电力系统。联合电力系统中心安排系统之间的交换功率,也可以安排机组启停和维修。但是为了调度目的而做出的这些决策,大部分是在能量控制中心完成的

(5)一(7)目前几乎都是人工的。关于自动化程度的远景设想,是由检查决策变量来提供的,这些决策变量是:发电机的有功功率输出和电压模值以及网络中各式各样开关和变压器分接头位置。当网络正常时,有功功率输出是用自动化程序来决定的。自动化程序包括经济调度和自动发电控制。所有其他决策变量由运行人员设置。

为了辅助运行人员决策,运行人员可以在计算机上调用各种仿真和最优化程序,以回答“如果…应该做…”。

在电力系统运行中,运行人员需要根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员需要根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。运行人员可以根据系统的实时数据,进行各种决策。这些决策包括发电机的有功功率输出、电压模值的调整,以及网络中开关和变压器分接头的位置。这些决策变量是系统运行的关键。

第二章 电力系统稳态分析的变量及约束

本章主要为下一章有关电力系统计算机辅助安全性调度的稳态分析提供预备知识。

2.1 潮流复习

潮流方程是稳态条件下的电力系统模型,关于潮流方程及其解法,在大学本科电力系统课程^[9]中已大量的讲述,就不再赘述,这里只打算概括地归纳一下,作为复习。

2.1.1 潮流方程

假设所研究的电力系统有 M 个节点,并且为了叙述上的方便,取 s 为松弛节点,该节点电压的模值与相角均为指定值,设 s 夹于节点号 $1-M_0$ 之间;取 $1-M_0$ (除 s 外)为 $P-Q$ 指定节点;取 M_0+1-M 为 $P-V$ 指定节点。

1. 节点电压方程和网络导纳矩阵

如图 2.1 所示已把中性点取作参考节点,在节点 i 的注入电流 I_i 将等于联结到该节点所有分支(包括对地分支)的电流之和。因此注入节点 i 的电流

$$\begin{aligned}
 I_i &= I_{i1} + \dots + I_{is} + \dots + I_{ie} + \dots + I_{iM} \\
 &= y_{i1}(\dot{V}_i - \dot{V}_1) + \dots + y_{is}(\dot{V}_i - \dot{V}_s) + \dots \\
 &\quad + y_{ie}(\dot{V}_i - \dot{V}_e) + \dots + y_{iM}(\dot{V}_i - \dot{V}_M) \\
 &= -y_{i1}\dot{V}_1 - \dots - y_{is}\dot{V}_s - \dots + (y_{i1} + \dots \\
 &\quad + y_{is} + \dots + y_{ie} + \dots + y_{iM})\dot{V}_i - \dots - y_{iM}\dot{V}_M \\
 &= \sum_{k=1}^M Y_{ik}\dot{V}_k \quad \text{对 } i=1, \dots, M
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

这就是众所周知的节点电压方程式。它也可用矩阵形式表示成

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{V} \tag{2.1a}$$

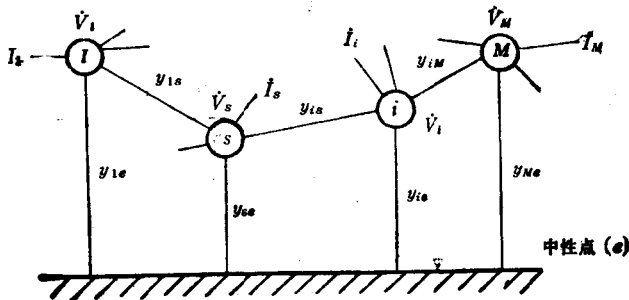


图 2.1 网络图