

电力系统最优分散协调控制

韩英铎 王仲鸿 陈淮金 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统阐述了多机电力系统最优分散协调控制的理论 and 应用,并反映了作者近年来在这一领域的研究成果。

书中内容包括:用于多机电力系统控制器设计的电力系统元件数学模型、阻尼系数的计算和取值,全状态量反馈线性最优控制原理、应用实例及现场试验结果,可选择控制器结构的最优分散协调控制,可实现多机电力系统精确解耦的关联测量最优分散控制,基于人工神经网络的电力系统智能控制、多种非线性控制器的协调控制及人工神经网络的实现,大规模电力系统特征值计算及降阶动态等值,多机电力系统中最优分散协调控制器的多种设计实例以及大量数字仿真和物理模型实验结果。

本书可作为理工科大学电力系统及其自动化专业、电气自动化专业高年级学生和研究生教材,也可供从事电力系统或其他工业系统控制研究和应用的科学工作者、工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统最优分散协调控制/韩英铎等著. —北京:清华大学出版社,1997

(现代电力系统丛书)

ISBN 7-302-02522-3

I. 电… II. 韩… III. 电力系统-最佳控制 IV. TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 10281 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

因特网地址: www.tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.25 字数: 476 千字

版 次: 1997 年 12 月 第 1 版 1997 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02522-3/TM·27

印 数: 0001~2300

定 价: (精) 32.00 元 (平) 28.00 元

现代电力系统丛书编委会

主 编 高景德

副 主 编 张凤祥 卢 强 陈寿孙

编 委 (按姓氏笔划)

卢 强	陈寿孙	张凤祥	张宝霖
庞家驹	周孝信	相年德	高景德
倪以信	韩祯祥	韩英铎	

责任编辑 范铁夫 刘元元

致 读 者

我国社会主义现代化建设的蓬勃发展,正在促进电力系统以空前的规模和速度扩大。到本世纪末,我国各大区将建成以 500 kV 超高压电网为主网,单机 300 MW~600 MW 为主力机组,装机容量达 4 万 MW~5 万 MW 的大型电力系统。超高压直流输电技术将进一步得到应用,大型电力系统间的互联将得到发展,随着三峡水电工程的兴建,西部地区电源的进一步开发,更高电压的输电系统和全国性的联网也将提上日程。对电力系统安全性、经济性和电能质量提出了更高的要求。实践证明,电力系统的规划设计、运行管理、分析和控制手段的现代化是满足这一要求的最佳途径,许多现代科学技术成果迅速在电力系统中得到推广应用,计算机技术、现代应用数学、现代控制理论、电力电子技术、人工智能等日益广泛深入地应用于电力系统,正在促使这一传统产业迅速走向高科技化。在电力系统安全经济水平和现代化水平提高的同时,电力系统学科也得到更新、丰富与发展。当前,亟需一批反映电力系统学科新进展、新成果的系列专著,为此我们组织编写了这套《现代电力系统丛书》。

丛书旨在反映当代国内外电力系统学科的最新发展和科学技术的水平。丛书将以现代科学的新理论、新方法在电力系统中的应用为主要内容,特别对在我国电力系统中已获得应用或将获得应用的最新成果进行重点介绍。

本丛书由科学出版社和清华大学出版社出版。希望本丛书对我国电力系统的发展、电力系统学科水平的提高、科技人员知识结构的改善将有所贡献。

编 委 会

前 言

我国电力系统已进入大机组、大系统、超高压远距离输电、跨区域联网的新的发展阶段。世界瞩目的三峡水电站的开发,使全国联网问题也提到议事日程上来。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,供应充足、可靠、优质、经济电能的要求更加强烈,对电力系统安全、稳定、高效运行控制的要求也日益提高。控制理论、计算机技术及微电子、大功率电力电子和现代通讯设备的元、器件的蓬勃发展又为控制器的改善或更新换代不断提供新的可能。

电力系统是多变量的动态大系统。60年代后期在国际上,余耀南教授等率先开展了现代控制理论用于电力系统的研究,为电力系统多变量控制开拓了新的有效途径。80年代初作者的合著《输电系统最优控制》首次详细介绍了线性最优控制理论及其应用,阐明了应用现代控制理论于电力系统的安全稳定控制的巨大效益和巨大潜力。作者与西北电管局及天津电气传动研究所等单位通过几年持续努力,于1986年在碧口电厂100 MW水轮发电机组上实现了多变量优化励磁控制,成为把线性最优控制理论成功应用于工业大机组的国际首例,为现代控制理论在电力系统中的工程应用展开了广阔的天地。迄今,全国使用线性最优励磁控制(LOEC)的机组已逾数百万千瓦,LOEC已成为受欢迎的、兼有调节器(AVR)和稳定器(PSS)功能的可供大型发电机组优选的励磁控制方案。

电力系统是个统一的、元件间相互耦合的整体。系统中每个厂、站、地区电网在分享联网的效益的同时,不仅要维持自己内部故障时的安全、稳定,还必须能够承受外部事故的波及,并且还应尽可能多地为全系统的安全和动态性能的改善作出贡献,至少不恶化全系统的安全和动态性能。这样,系统中每个重要控制器的设计就不仅要解决控制器的可实现问题——即按本地可测量进行反馈的最优分散问题——或简称分散问题、解耦问题,还必须同时解决各分散控制器的整体控制效果最佳的问题——即各分散控制器间的最优协调问题或简称协调问题。因此,最优地“分散—协调”应是在多机系统中各主要控制器设计的准则也是在多机系统中控制器设计中必须着力解决的根本问题和实际问题。可惜,由于理论和实践两方面的困难,这一问题长期没有很好解决。线性最优控制理论用于多机电力系统的局限首先是难以处理如何分散的问题,进而也难以解决分散以后的最优协调问题。本书是《输电系统最优控制》一书的姊妹篇,如果说《输电系统最优控制》一书的重点是解决简单电力系统模式的最优控制的理论与实际问题的话,基于随后十余年的研究和实践而写成的本书,则系统分析了多机电力系统中控制器设计必须面对的一系列理论和实际问题。进而根据电力系统的特点给出了设计最优分散协调控制器的基本理论和多种有效途径,使在允许线性化范围内的多机系统的分散协调控制器设计问题得到满意的解决。采用反馈线性化或各种线性化映射后,多机电力系统考虑平滑非线性控制器最优分散协调设计问题也可在此基础上得到满意的解决。为了处理具有强非线性的控制器的设计和多种非线性控制器的综合,本书还介绍了基于人工神经网络的电力系统智能控制的研究

成果。

为了澄清概念,本书在第二章专门用一节探讨了同步发电机阻尼系数的计算及其取值问题。为了承前启后,在第三章扼要介绍了全状态量反馈最优控制的基本理论及若干工程应用结果,包括现场试验结果。

经过近廿余年的发展,“现代控制理论在电力系统中的应用”如今已成为电力系统学科的一个引人注目和富有生气的分支。对新理论、新方法的引用和研究十分活跃。显然,对新理论和新方法的引用必须有的放矢,才会具有工程实用价值。为了使这一研究更切近电力系统实际并不断引向深入,本书力求对电力系统控制器实际综合需要,解决的现状以及需要进一步着力研究解决的问题加以清楚地阐述。

这本书是作者所领导的研究组近十余年来在电力系统控制领域研究成果的概括和总结。高景德老师、黄眉老师对研究工作给予了长期的指导与帮助,崔文进、童陆园、闵勇副教授,王雨蓬、宋永华博士以及曾作为或正作为博士生和硕士生的吴壬华、周肖杰、修林成、何学农、宋虎岩、刘文华、姜威、雍太有、姜其荣同志先后对本书的工作作出了贡献。韩英铎、王仲鸿同志在积累了多年研究成果的基础上制订了本书大纲,并对章节安排作了统一规划,姜威同志为本书的写作搜集了部分资料、撰写了部分初稿,随后由陈淮金同志完成了第一稿。在此基础上韩英铎、王仲鸿同志又进行了充实和全面地修改、审定。刘元元同志对本书进行了详细地编审,还对本书的内容提出了许多宝贵意见。

书中错误与不妥之处欢迎批评指正。

作 者
1996 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 现代电力系统	1
1.2 电力系统运行的稳定性及其控制	2
1.3 电力系统的分散协调控制	5
1.4 电力系统的智能控制	7
第二章 电力系统元件的数学模型	9
2.1 同步电机的数学模型	9
2.1.1 电压方程和磁链方程	9
2.1.2 凸极同步电机的自感系数和互感系数	11
2.1.3 派克变换	13
2.1.4 同步电机的标么值系统及标么值派克方程	19
2.1.5 同步电机的输出功率及电磁转矩	23
2.1.6 同步电机转子运动方程	24
2.1.7 发电机电磁暂态过程实用模型	27
2.1.8 关于阻尼系数 D	37
2.2 网络的数学模型	47
2.3 励磁系统的数学模型	48
2.3.1 励磁功率单元的数学模型	49
2.3.2 励磁调节器的数学模型	53
2.4 原动机、调速系统的数学模型	55
2.4.1 原动机的数学模型	55
2.4.2 调速系统的数学模型	58
2.4.3 汽轮机汽门快控特性	61
2.5 直流输电系统的数学模型	62
2.5.1 概述	62
2.5.2 整流站公式	64
2.5.3 逆变站公式	67
2.5.4 直流输电线路公式	69
2.5.5 直流输电调节系统的数学模型	70
2.5.6 标么值系统	72
第三章 全状态量反馈线性最优控制	73
3.1 概述	73
3.2 全状态量反馈线性最优控制系统设计原理	74

3.3	同维输出量反馈的线性最优控制	79
3.4	全状态量反馈及同维输出量反馈线性最优励磁控制	81
3.4.1	励磁控制的作用及励磁控制技术的发展	81
3.4.2	全状态量反馈及同维输出量反馈最优励磁控制系统的设计	84
3.4.3	最优励磁控制的效益	91
3.4.4	全状态量反馈的最优励磁控制器与 PSS 的性能比较	95
3.4.5	碧口电厂 100MW 水轮发电机组采用 LOEC 现场试验结果	97
3.4.6	全状态量反馈最优励磁调节器动态特性的综合分析	98
3.5	并联运行的柴油发电机组调速、励磁和功率分配综合最优控制	102
3.5.1	柴油发电机组并联运行的稳定性	103
3.5.2	并联运行的柴油发电机组的数学模型	103
3.5.3	综合最优控制规律及其实现	105
3.5.4	仿真研究和现场调试试验结果	110
第四章	可选择控制结构的最优分散协调控制	115
4.1	概述	115
4.1.1	孤立分散控制与协调分散控制	115
4.1.2	电力系统性能指标	116
4.1.3	二次型性能指标	117
4.2	部分输出量反馈控制	119
4.2.1	预备定理及矩阵迹的基本运算法则	119
4.2.2	部分输出量反馈控制	121
4.3	具有可选择控制结构约束的大系统分散协调控制	125
4.3.1	矩阵迹对对角块矩阵的求导法则	126
4.3.2	按子系统状态量反馈的分散协调控制	127
4.3.3	可选择控制结构的部分输出量反馈最优分散协调控制	128
4.4	几种控制方法的关系和固定模	133
4.4.1	几种控制方法的关系	133
4.4.2	固定模的概念	135
4.5	Levine-Athans 方程组的求解	136
4.5.1	一阶梯度法	137
4.5.2	共轭梯度法	138
4.5.3	直接迭代法	140
4.5.4	初始稳定的分散控制反馈增益阵 $K_L^{(0)}$ 的求法	142
4.5.5	几种算法比较	143
第五章	输出反馈最优分散协调励磁控制器	146
5.1	输出反馈分散协调励磁控制器简介	146
5.2	多机电力系统状态方程和输出方程	146
5.2.1	各环节的数学模型	147

5.2.2	线性化和偏差化	148
5.2.3	d - q 坐标系与 x - y 坐标系的变换	150
5.2.4	建立状态方程	151
5.2.5	建立输出方程	151
5.3	输出反馈最优分散协调励磁控制器的问题描述	153
5.4	权矩阵的选择	154
5.4.1	权矩阵选择的相关特性法	154
5.4.2	计算实例	155
5.4.3	几种影响因素分析	160
5.5	反馈变量的选择及分散控制器装设地点的确定	164
5.5.1	反馈变量的选择	164
5.5.2	控制器装设地点的选择	166
5.6	动模试验和数字仿真	171
5.6.1	三机系统的动模试验	171
5.6.2	六机系统的数字仿真	175
第六章	交直流混合输电系统的分散协调控制	178
6.1	概述	178
6.2	状态方程及输出方程	178
6.2.1	直流系统的数学模型	178
6.2.2	直流系统数学模型的线性化和偏差化	180
6.2.3	同步发电机部分的线性化数学模型	184
6.2.4	交流网络模型及坐标变换	185
6.2.5	建立状态方程和输出方程	187
6.3	直流系统分散协调控制器的设计举例	189
6.3.1	控制器设计方法	190
6.3.2	各种不同方案控制器设计结果比较	190
6.3.3	运行条件改变时分散协调控制器的适应性	195
6.3.4	时域仿真结果	196
6.4	小结	199
第七章	电力系统关联测量分散控制	200
7.1	概述	200
7.2	数学模型的处理	201
7.3	各子系统分散控制规律的求取	204
7.4	$\Delta E'_{qi}, \Delta I_{qi}, \Delta I_{di}$ 的转换	207
7.5	多机电力系统关联测量最优分散协调控制器设计举例	208
7.5.1	电力系统关联测量最优分散协调控制器设计步骤	208
7.5.2	设计举例的系统及参数	209
7.5.3	控制器设计结果及小干扰动态响应比较	210

7.5.4	控制器设计结果的暂态稳定仿真比较	217
7.6	小结	220
第八章	大规模电力系统特征值计算及降阶动态等值——相对关联分析法	221
8.1	概述	221
8.2	相对关联模型	221
8.3	电力系统的关联模型	224
8.3.1	电力系统第一关联增益阵的求取	224
8.3.2	电力系统相对关联增益阵的计算举例	226
8.4	相对关联分析方法在大规模系统特征值计算及控制器设计中的应用	228
8.4.1	基本思路	228
8.4.2	特征值计算与控制器设计举例	229
第九章	基于人工神经网络的电力系统智能控制	242
9.1	概述	242
9.2	人工神经元及神经网络	244
9.2.1	神经元	244
9.2.2	转移函数	245
9.2.3	前馈网络与反馈网络	247
9.3	BP 模型与算法	248
9.4	人工神经网络的实现	252
9.4.1	实现人工神经网络的一些方案	252
9.4.2	用数字硬件查表法实现任意非线性转移函数	255
9.4.3	固定连接权前馈神经网络硬件实现	257
9.4.4	前馈神经网络硬件校验	259
9.5	人工神经网络快速汽门自适应控制器	262
9.5.1	汽门快控技术发展现状	262
9.5.2	人工神经网络汽门自适应控制器设计的基本思路	265
9.5.3	输入特征量的选取及采样	266
9.5.4	样本集的构成	267
9.5.5	人工神经网络汽门控制器的训练	269
9.5.6	控制效果数字仿真	271
9.5.7	神经网络控制器的“内插”功能	275
9.5.8	人工神经网络汽门控制的动模试验研究	277
9.6	基于人工神经网络的励磁调节、快控汽门和电阻制动的协调控制	281
9.6.1	控制器模型和控制器设计	282
9.6.2	数字仿真结果	284
9.6.3	结论	285
附录 A	矩阵微积分	286
A.1	基本定义	286

A.2	矩阵微分法则	287
A.3	矩阵指数及其性质	288
A.4	方阵的迹及其导数	288
附录 B	线性定常系统微分方程组的解及其状态转移矩阵	290
B.1	线性齐次微分方程组的解	290
B.2	线性非齐次定常微分方程组的解	291
B.3	线性定常连续系统的能控性	292
B.4	线性定常连续系统的能观测性	293
附录 C	矩阵李雅普诺夫方程的求解方法	296
C.1	直接展开法	296
C.2	级数展开法	297
附录 D	决定一般闭环系统最优控制规律的海米尔登——庞特利亚金方程	300
D.1	欧拉方程	300
D.2	欧拉—拉格朗日方程	300
参考文献		304

第一章 绪 论

1.1 现代电力系统

人类社会的进步与人类掌握和运用能源的水平提高息息相关。资料^[1]表明,成人处在完全静止状态时通过新陈代谢每公斤体重每小时的热量消耗为 4.2 kJ。这样 4.2 kJ/h $\approx$ 1.2 W,一个 70 kg 体重的人的新陈代谢消耗大约 80 W。一个体力劳动者的食物消耗大约 17 000 kJ/天 $\approx$ 708.3 kJ/h $\approx$ 202 W。一个强健的人只能在几小时内连续给出约 80 W 的机械功率,一匹马大约只可提供 600 W 的机械功率。表 1-1-1 给出人类能源消耗的历史发展情况。

表 1-1-1 人类能源消耗的历史发展概况^[1] (每人年能源消耗, kW)

	总消耗	食	住+商业	工农	交通
原始社会	0.10	0.10	0	0	0
游牧社会	0.25	0.15	0.10	0	0
农耕社会	0.60	0.20	0.20	0.20	0
中世纪	1.25	1.30	0.45	0.30	0.20
现代发达国家(A)	4.60	0.40	1.50	1.80	0.90
(B)	11.10	0.65	3.05	4.10	3.30

可见,对能源的掌握与运用推动了人类社会从低级向高级发展。如今能源供应系统已成为现代社会赖以生存的支柱。

由于电能具有许多特殊的优越性,例如,便于进行各种复杂的控制,可以以光速长距离传输,可方便、高效地转换成其他能量形式以及环境污染小等,使“电”成为现代文明社会不可或缺的二次能源。在近百年的工业发展史中电力工业的发展速度可说是独占鳌头。美国,1882 年仅在纽约有总容量 30 kW,220/110 V 的直流电供应白炽灯照明,而到了 1992 年,其全国装机已达 794 888 MW。中国,1882 年仅在上海有很小的直流发电机供给弧光灯照明,到 1912 年在云南有了第一个水电站,容量 240 kW,到了 1992 年全国装机则已达 166 532 MW,在 80 年中增长了 70 万倍。到 1996 年,我国总装机容量已达 2.35 亿 kW,发电量超过 1 万亿度,两者皆居世界第二位。并且仍在以大约 7% 的年增长速度突飞猛进。到 2000 年全国发电装机容量将达到 3 亿 kW 左右。为了实现“充足、可靠、优质、经济”的电的供应,电力工业可说是融汇了近百年来所有工程科技进步的成果。现代电力系统已不仅是巨大的发—送—供的网络,还是拥有从卫星到微波、载波、高频各种通讯手段的巨大的计算机监测控制的系统,已成为电力设备与计算机、各种控制器及通讯网的有机的整体。由于电能生产不仅是衡量综合国力的重要标志,也是决定一个国家生产发展水平和生活水平的主要因素,因此电力系统的技术改造可以说一天也没有停止过。由于对电

力系统的各个主要组成部件的第一位要求都是安全、可靠,因此这些设备一般都是相当昂贵的而且具有几年到几十年的较长的使用寿命(表 1-1-2 给出了电力系统各主要设备的一般使用寿命),这就决定了电力系统总体上不可能报废了重建而总是用新技术改造老设备(或局部更换老设备)以期以少的投入换取巨大的经济效益和社会效益。因此现代电力系统必然成为各种现代新技术大量被引入和渗透的交汇点。

表 1-1-2 电力系统主要设备的一般使用寿命^[1]

电力系统主要设备	一般寿命	电力系统主要设备	一般寿命
常规火电厂锅炉设备	15 年	变压器	20 年
常规火电厂汽轮发电机成套设备	15 年	50 kV 以上高压架空线	35 年
核电站蒸气发生设备	19 年	高压电缆	35 年
核电站汽轮发电机成套设备	12 年	低压电缆	25 年
开关设备	20 年		

发达国家的电力系统容量已趋饱和,其年增长速度保持 2%~3% 已敷使用。由于投资和环保等因素的制约,使其电力系统技术的发展日益向安全、可靠、灵活、高效方面去求索。计算机、光纤通讯以及大功率电力电子技术的广泛应用为电力系统控制提供了新的有效硬件基础;而更加安全、可靠、灵活、高效的需求则向电力系统控制提出了新的更高的要求。世界上的一些著名的大停电事故也表明现代电力系统在一定意义上讲还是相当脆弱的动态大系统。因此,研究电力系统的安全稳定控制仍是当前电力系统学科的重要课题。

我国电力系统正处在特殊的发展阶段。虽然我国已建成了多个千万千瓦级的现代化区域电网,但网络还很薄弱,安全稳定水平还很低,过去二十多年总共曾发生过三百多次稳定事故^[118]。虽然我国总装机容量已跃居世界第二,但全国(大陆部分)人均拥有的装机容量还只是世界平均水平的 1/3,不及发达国家平均水平的 1/10,特别是还有数千万边远农村人口尚未用上电。严重的缺电就决定了我们必须保持高的电力增长速度。资金不足这又决定了我们必须采用适合中国国情的高新技术,更多的靠“二次”或新的控制来弥补“一次”——输电能力方面的不足。

1.2 电力系统运行的稳定性及其控制

我国电力系统已步入大电网、大机组、交直流混合远距离输电、跨区域联网的新阶段。

随着三峡水电站的开发,全国联网已是大势所趋。远距离输电和电网互联对于发挥大的水、火电基地和大机组的作用,对于全网经济调度和事故备用都十分有利,同时也带来一系列影响电力系统运行稳定性的新因素,需要引起注意并认真加以解决。用十分通俗的话来讲^[18]：“大家在分享互联的好处的同时也要一起分担互联的问题,每个相邻的系统都必须负起责任,当邻居遇到麻烦时,能通过自己的安全措施和备用措施对其有所帮助,进一步也要限制自己的安全受邻居影响的程度。因为互联以后各子系统的安全性极限要依赖于外部邻居的条件,这就使其安全性常有一定的脆弱性。”远距离输电和电网互联的目的是为了进行正常运行时的功率授受和紧急状态时的相互支援,但两者都要受送电极限

的限制。一些发达国家的电网联系紧密,如英国 400 kV 电网开关站间输电线平均长度仅 45 km^[19],其送电极限主要受热稳极限限制。我国输电网络或地区电网间的联络线普遍比较薄弱,目前其送电极限主要受稳定极限的限制。

电力系统稳定,目前人们关注的主要是功角稳定、频率稳定和电压稳定。

功角稳定包括静态稳定和暂态稳定。**静态稳定性**又称小干扰稳定性,是指系统在遭受很小的干扰或“无穷小”干扰时,维持稳定运行,不发生爬行失步或振荡失步的能力。实际上这是个正常运行点或运行方式能否建立起来或离静稳边界多远、静稳储备多大的问题。静稳的问题是“必然性”的问题,即在实际运行中超出了静稳极限,这种运行方式根本建立不起来,无论考虑不考虑各种调节器的作用均是如此,只不过静稳极限的限度不同而已。与此相反,**暂态稳定性**问题则是“或然性问题”,是指系统在遭受大干扰——一般指各种短路故障——后是否能维持在原运行点或过渡到新的运行点稳定运行的能力。其稳定的性质和稳定的极限既与事故前的正常运行点或系统运行方式有关又与故障严重程度和反事故措施有关,而故障是随机的。

一些北美的文献和教材曾把在小干扰下考虑调节器动作性能时的稳定性称作“动态稳定性”,我国一些教科书也曾沿用。考虑到西欧和前苏联习惯上一直把大干扰下的暂态稳定称为动态稳定,我国和其他许多国家也是如此,故 IEEE^[20]工作组报告及不少学者^[21,22,12]都建议不再用动态稳定这一术语,以免混淆。

频率稳定通常是指系统突然出现大的有功不平衡后,能否通过调节热备用出力或自动切除部分负荷来维持全系统或解列后的子系统的频率使不降到危险值以下,而在统一频率下稳定运行的问题。系统互联,虽使系统承受有功冲击的能力加强了,但系统可能遭遇的有功不平衡量也可能加大了,因此频率稳定的问题不是可以忽视了,而是更需加强了。

电压稳定是指由于无功功率的供需不平衡所引起的部分地区或全系统的电压不能维持在正常允许范围稳定运行的问题。远距离输电系统及互联系统如果受电端缺乏足够的无功电源对其电压进行有效的支撑,则在某些正常运行方式下,事故后的运行方式下或动态过程中,由于无功电源的容量或调节能力的变化就会演变成地区系统甚至全系统的电压崩溃。

当一个地区发生电压崩溃时往往会引发其两侧远距离电源间的功角稳定破坏。同样,在系统出现大的有功缺额时,如大型机组或电源的失去,同时也会造成无功的大不平衡,从而可能首先导致电压稳定问题,而不是频率稳定问题。因此实际电力系统中稳定问题是很复杂的,各种稳定现象常常是伴生的,互为因果的,需要审慎地进行综合分析。有长距离输电线的、联系比较松散的互联系统,在出现大的有功缺额后伴随而来的是潮流和一些主要负荷点的电压都会发生明显变化,从而会影响整个频率动态过程,仅用单机模型(忽略线路和电压等因素)来描述和分析全系统的频率动态过程是不够的,应该用较详细的多机系统模型来进行分析并校验低频减载动作的情况^[23]。为防止电压崩溃,装设低电压减载是有效的。

一些文献按过程的时间对稳定分类。静态稳定和暂态稳定过程以秒计称为短时间稳定;频率稳定问题持续时间比较长,常达数十秒到数分钟,属于中期稳定;当考虑锅炉动态

过程的影响时称长期稳定^[24]；考虑失步以后再同期的稳定过程又称结局稳定^[13]。

可以用来改善电力系统稳定的措施很多。表 1-2-1 给出了一些常用措施及它们对静态稳定和暂态稳定的改善程度的比较。FACTS(柔性交流输电系统)技术的发展为改善电力系统的安全与稳定展现了美好的前景。表 1-2-2 给出了几种主要的 FACTS 装置对稳定的影响。两表中 * 越多表示效果越好。

表 1-2-1 各种常用稳定措施及改善稳定效果

效 果 措 施	项 目	静态稳定	暂态稳定	阻尼低频振荡
提高系统电压等级		**	**	*
增设线路		**	**	*
中间调相设备		*	*	*
设置中间开关站			*	
快速切除故障			*	
自动重合闸			*	
快速励磁+附加镇定器(PSS)		**		**
多变量反馈最优励磁控制		**	*	**
电气制动			*	
快控汽门			**	
区域稳定控制			**	

表 1-2-2 几种 FACTS 装置改善稳定的效果

效 果 装 置	项 目	静态稳定	暂态稳定	阻尼低频振荡	阻尼次同步振荡	电压稳定
新型静止无功发生器 (STATCOM, ASVG)		***	**	**		***
可控串补(TCSC)		***	**	**	***	
可控移相器(TCPS)		*	**	**	**	
统一潮流控制器(UPFC)		**	***	***	**	

遵循好的控制规律,以及多种控制器之间很好地协调是上述各种控制手段充分发挥作用的关键。

随着对电能供应的安全、稳定、经济性要求的日益提高,对电力系统的控制要求也在日益提高,致使电力系统控制措施正趋向于^[41]:

- 控制策略上,日益向最优化、适应化、协调化、区域化发展;
- 设计分析上,日益要求面对多机模型处理问题;
- 理论工具上,越来越多地借助于现代控制理论;
- 控制手段上,日益增加了微机、电力电子器件和远程通讯的应用;
- 研究人员构成上,日益需要多“兵种”的配合作战。

1.3 电力系统的分散协调控制

电力系统是地域分布非常广阔的大系统。1.2 节所述各种改善稳定的控制措施中除有的区域稳定控制方案采用中央信号处理机对信号进行集中处理然后集中控制外,通常都是按地域分散配置和分散控制的。

传统的分散配置的分散控制器实际上是在简化模型下设计的“孤立”控制器,只考虑本机可测信号,不考虑多机系统之间的关联作用,也不考虑系统中其他控制器的存在及其交互影响。其结果是使这种控制器只能对改善本机控制特性有一定好处,对系统中其他相邻机组的动态行为不可能有确定的改善,相反却存在由于各控制器之间动作无法相互协调而使系统或各自的控制特性恶化的可能。北美系统在进一步加装 PSS 过程中曾有过由于缺乏相互协调而使低频振荡现象重新出现甚至加剧^[8]的实例,便是很好的佐证。FACTS 技术的发展将在电力系统新增加一批响应时间常数以毫秒计的非常灵敏的控制器,这些新控制器之间动作的协调以及它们与原有控制器间的协调也是需要研究解决的重要的理论和实际问题。

全状态量反馈(或全维输出量反馈)最优控制可以按全系统性能指标对各个控制器的动态行为进行协调,但其各个控制器的反馈量必须取全系统所有状态量或输出量,这在复杂电力系统中无论从反馈量的数目考虑还是信息传输的地域考虑都是无法实现的,也是没有必要的。因为在全状态量反馈中也只是紧密相关的一些状态量间反馈才有明显作用,弱相关的状态量间的反馈并不起明显作用,何况从工程需要出发仅取本地可测状态量或输出量,适当地考虑关联也可以得到性能优越的控制器。

多机系统的最优分散协调控制与分散“孤立”控制的本质区别就在于它能够科学地处理多机系统中受控对象如何解耦,解耦以后又怎样按给定性能指标进行分散控制器之间的最优协调问题。

严格来讲,在多机电力系统中,任何重要的控制器的设计均需面对下列一些关键技术问题:

- ① 控制器结构的选择及反馈变量的选取;
- ② 多机或多子系统间关联的处理,如何分散,如何解耦;
- ③ 控制器地点的选择及参数的整定;
- ④ 同一地区多种控制器间的协调,不同地区控制器间的协调;
- ⑤ 非线性和不确定性的处理;
- ⑥ 对运行点、运行方式变化的适应性及对不同干扰的适应性;
- ⑦ 多目标的协调;
- ⑧ 大规模矩阵特征值的分析;
- ⑨ 为简化控制器设计计算所需要的多机系统降阶动态等值。

本书后面各章对上述诸问题的解决,分别给出了现实、合理的途径。图 1-3-1 则表明多机系统分散协调控制理论是处理上述诸多问题的理论基础。

分散协调控制理论属于大系统理论的一个重要分支,它的研究内容是:在限定各局

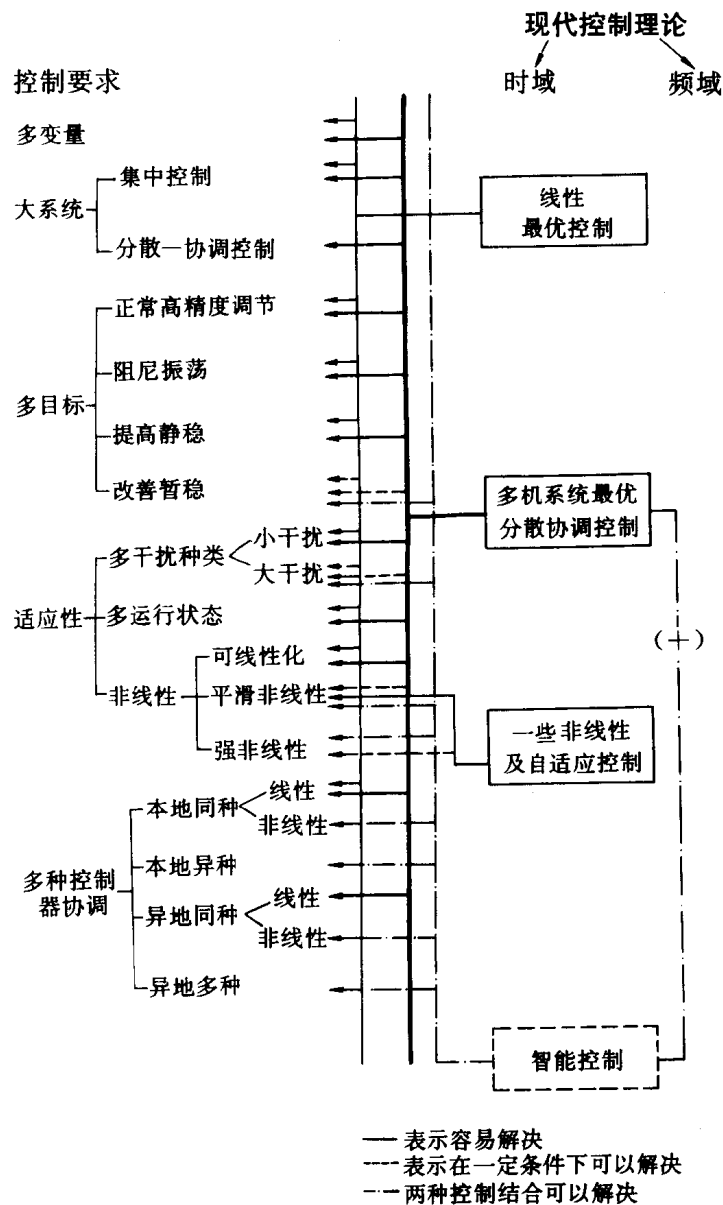


图 1-3-1 多机系统分散控制理论的适用范围

部控制器仅反馈当地可以测得的状态量或输出量的条件下,如何设计和协调这些局部控制器的控制规律,以使系统的总体性能最优。

分散协调控制理论的出现始于 70 年代初,迄今虽然其理论体系尚不够完善,但在理论研究和设计方法上已取得长足进展。

从对控制对象数学模型的处理方式看,分散控制器的设计方法大体可分为两大类:一类是首先将大系统模型进行分解,然后在子系统模型基础上设计各局部控制器;另一类是以全系统模型为基础设计各局部控制器,但对各局部控制器的控制结构加以分散约束。在