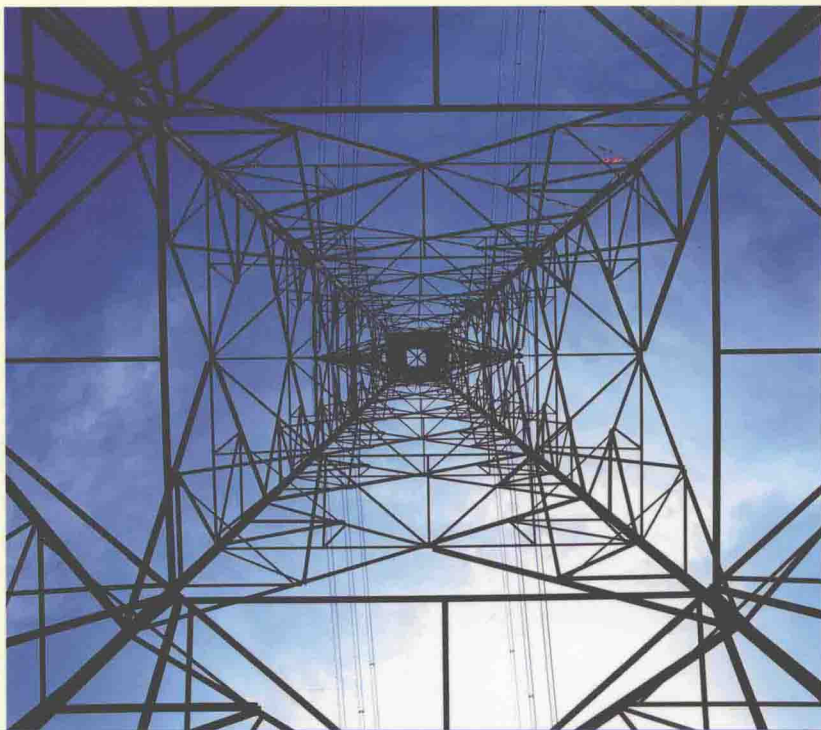


贵州电网广域监测与 控制技术

贵州电网有限责任公司 组编

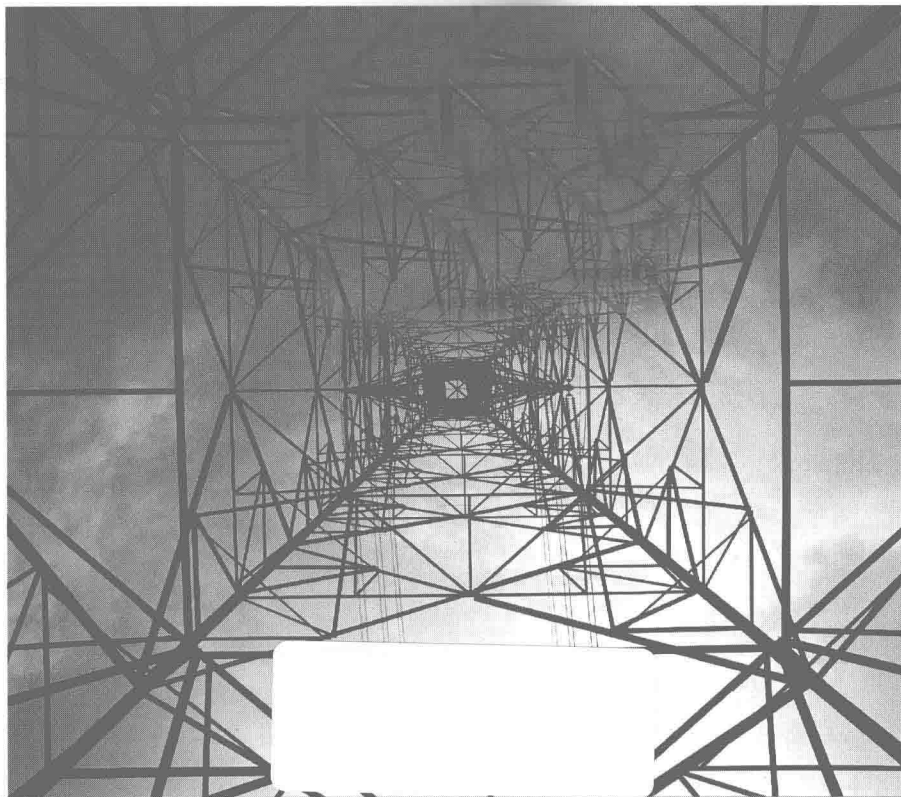


贵州大学出版社
Guizhou University Press

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

贵州电网广域监测与 控制技术

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

图书在版编目 (C I P) 数据

贵州电网广域监测与控制技术 / 贵州电网有限责任

公司组编. — 贵阳: 贵州大学出版社, 2014.11

(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)

ISBN 978-7-81126-732-7

I. ①贵… II. ①贵… III. ①电网—监控系统 IV.

①TM734

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 246109 号

贵州电网广域监测与控制技术

组 编: 贵州电网有限责任公司

责任编辑: 但明天

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵阳快捷彩印有限公司

开 本: 720 毫米×1000 毫米 1/16

印 张: 26.25

字 数: 473 千字

版 次: 2014 年 12 月 第 1 版

印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-732-7

定 价: 84.00 元

版权所有 违权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换

电话: 0851-5981027

编 委 会

主 编 康 鹏

副主编 沈冠全 林 成

参 编	赵维兴	王国松	王 平	马覃峰
	左 军	戴席伟	李 冶	王向东
	陈登墀	蒋友权		

前言

近年来,国内外多次发生大范围停电事故,例如1978年12月19日法国电网的电压崩溃事故导致停电负荷达29000MW,占当时法国电网总负荷的75%;1987年7月23日东京电网停电事故损失负荷8168MW;2003年8月14日美加大停电事故,2006年11月4日欧洲跨国互联电网大面积停电事故,2005年5月25日俄罗斯莫斯科大范围停电事故等等。其中,莫斯科大范围停电事故的主要原因和故障扩散原因之一就是电网运行中的微小隐患没有引起调度运行人员的足够重视,对电网整体运行信息掌握不够,进而逐步演变为严重的电网停电事故。

如今,电网规模不断扩大,特高压交直流复杂互联电网的出现,电力系统结构和运行方式日渐复杂,仅仅依靠调度运行人员凭经验判断电网运行状态,并进行决策控制,这种自动化水平低下的传统型调度模式已难以适应目前电网技术的发展。

随着信息技术的快速发展,借助高速计算机网络,电网动态数据获取可通过EMS、DEMS及PMU技术实现,各级调控中心能够快速、准确、全面地掌握电网实时运行状态,为调度运行人员提供分析结果,包括电网各类裕度指标、风险辨识、预控制措施等,调度员得到的信息更加直观有效,决策的时间相应减少,合理性也得到了提高,能够有效地避免大面积停电事故发生。

南方电网网架结构呈现典型的长距离、大容量交直流输电的特性,动态特性十分复杂。动态稳定问题已成为限制南方电网区域间功率传输能力、严重影响系统安全稳定运行的突出问题。除了传统的弱阻尼引发的区域间低频振荡外,近些年来,南方电网也多次出现因地区电网弱阻尼引发的振荡,以及因机组调速、励磁系统异常引发的强迫型功率振荡。这些振荡通常表现为

局部模式，但当振荡频率与区域间振荡频率接近时，则可能引发系统的共振。区间联络线和强相关机组功率的大幅波动，掩盖了实际的振荡源，也大大增加了调度员判断振荡原因，以及采取有效抑制措施的难度。

2006 年至 2013 年底，南方电网区域共发生 21 次功率振荡，其中贵州电网 7 次，原因有弱阻尼低频振荡、机组调速系统异常强迫性振荡等。

电网稳定是社会稳定的重要保障之一，大范围停电事故一旦发生，整个受灾区域都会陷入瘫痪状态甚至发生骚乱，造成巨大的经济损失和社会影响。例如 2003 年 8 月 14 日发生的美加大范围停电事故，使数千万人受到影响，总经济损失为 40~100 亿美元。在纽约等大城市，停电造成整个城市交通、通讯、医疗等系统无法正常运行，成千上万的市民涌上街头，无法进行正常的工作和生活。1977 年 7 月 13 日纽约市停电，在 26 小时内全市陷入一片混乱之中。

2006 年 7 月 1 日晚，河南省电网一 500 千伏变电站因与其相连的某双回线之第二回线路运行中发生差动保护装置误动作，导致两台开关跳闸。随后，第一回线路差动保护装置“过负荷保护”动作，导致该变电站另外两台开关跳闸，而对侧变电站安全稳定装置拒动。随后，河南电网多条 220 千伏线路故障跳闸，一座 500 千伏变电站及部分 220 千伏变电站出现满载或过负荷，一些发电厂电压迅速下降。河南电网有两个区域电网的潮流和电压出现周期性波动，电压急剧下降，系统出现振荡。由于受振荡影响，部分发电机组相继跳闸停运。省电力调度中心紧急切除某地区部分负荷，拉停部分 220 千伏变电站主变压器。国家电力调度中心下令华中电网与某相邻电网解列，华中电网外送功率迅速大幅降低。之后，电网功率振荡平息。在事故发生过程和处置过程中，共有 5 条 500 千伏、5 条 220 千伏线路跳闸，共停运发电机组 32 台，减少发电出力 577 万千瓦。河南、湖北、湖南和江西四省电网低频减载装置动作切除负荷 160 万千瓦，河南省电网减供负荷 276.5 万千瓦（华中电网共损失负荷 379.4 万千瓦），河南省电网电量损失 232 万千瓦时。湖北省电网电量损失 27 万千瓦时，江西省电网电量损失 9.16 万千瓦时，湖南省电网电量损失 12.3 万千瓦时，电量损失合计 280.46 万千瓦时；系统功率振荡期间频

率最低为 49.11 赫兹，华中东部电网与川渝电网解列，华中电网与西北电网直流闭锁，并与华北电网解列，可见系统功率振荡后果相当严重。

研究有效提高电网稳定性技术，经济和社会效益相当可观。基于此背景，2006 年贵州电网公司电力调度控制中心开始 WAMS/PMU 技术研究，并建成贵州电网 WAMS 主站。2008 年至 2010 年与清华大学、武汉大学、河海大学、南网电力科学研究院等单位陆续开展了贵州电网广域测量系统建设与动态安全性评估的应用技术研究与实施项目，建成了贵州电网广域测量系统数据共享平台，在此平台基础上，实现了基于广域的负荷模型参数辨识、动态电压稳定在线监测、低频振荡在线监测与预警以及多机 PSS 参数在线整定、利用 PMU 信息在线计算各区域主导节点的电压稳定裕度指标，进行电压稳定预警。其中低频振荡在线监测与预警系统中已经实现了振荡模式的在线辨识，能实时辨识出振荡模式的频率、阻尼、幅值和相位等信息，以便及时提取出故障信息，供调度运行人员实施控制参考。

2011 年贵州电网以广域测量系统和在线分析技术为核心，着重研究基于广域信息控制技术及工程实现。研究电网扰动源的在线辨识，实现广域 PSS 闭环控制，实现电网电压稳定水平动态预警及动态解耦控制，最终建成贵州电网基于广域信息安全防御体系。

本书由康鹏主编，沈冠全、林成副主编，赵维兴、王国松、王平、马覃峰、左军、戴席伟、李冶、王向东、陈登墀、蒋友权等参加了编写，赵维兴对全书进行了校阅。本书依据近年来贵州电网与各科研院校合作研究成果编写而成，可供广大同行人员学习和参考。

目 录

第一篇 基于 WAMS 的电力系统监测技术

第 1 章 广域监测系统.....	3
1.1 相量测量单元.....	3
1.2 广域监测系统.....	4
1.2.1 系统架构.....	4
1.2.2 WAMS 主站.....	6
1.2.3 数据共享内存系统.....	7
1.3 本章小结.....	9
第 2 章 基于 Prony 算法的低频振荡在线监测.....	11
2.1 电力系统低频振荡分析基本理论.....	11
2.2 多信号 Prony 算法简介.....	14
2.2.1 多信号 Prony 算法辨识振荡模态.....	16
2.2.2 多信号 Prony 算法需要注意的问题.....	17
2.3 线性系统能观性与能控性理论.....	20
2.3.1 低频振荡特征模式的能控性与能观性.....	20
2.3.2 线性系统的能控性与能观性.....	20
2.3.3 输出反馈系统中观测与控制的综合.....	26
2.4 贵州电网基于 WAMS 的低频振荡在线监测系统.....	30
2.5 本章小结.....	33
第 3 章 基于 WAMS 的电压稳定性在线监测.....	35
3.1 电压稳定性研究现状.....	35

3.1.1	电压稳定的定义和分类	35
3.1.2	电压稳定机理	37
3.1.3	电压稳定安全指标	39
3.1.4	电压稳定性研究方法	40
3.1.5	电压稳定性监测	44
3.1.6	电压稳定性控制	46
3.2	考虑综合负荷动态特性的最小短路容量研究	49
3.2.1	感应电动机参数变化对电机启动时最小短路容量的 影响	50
3.2.2	负荷模型中其它参数变化对电机启动时最小短路 容量的影响	57
3.3	基于动态转移阻抗的短路容量在线跟踪研究	60
3.3.1	基于全微分戴维南等值的短路容量计算方法	61
3.3.2	基于动态转移阻抗的短路容量跟踪算法	63
3.3.3	仿真分析	70
3.4	本章小结	75

第二篇 基于 WAMS 电力系统的低频振荡与阻尼控制

第 4 章	基于 WAMS 的 PSS 参数在线优化与阻尼控制模型	79
4.1	广域信号对振荡模式的影响	80
4.2	特征根对广域阻尼控制增益的灵敏度	81
4.3	PSS 参数在线再整定算法	83
4.3.1	单一振荡模式控制	83
4.3.2	特征值对广域阻尼控制增益的灵敏度矩阵	87
4.3.3	所有广域阻尼控制器对单个机电振荡模式的 控制作用	90
4.3.4	单个广域阻尼控制器对所有机电振荡模式的	

控制作用	91
4.4 两区四机系统算例研究	95
4.4.1 低频振荡模式区域扩展模型	96
4.4.2 基于区域扩展模型分析所有控制器对单个模式的 控制作用	98
4.4.3 基于区域扩展模型分析单个控制器对所有模式的 控制作用	99
4.5 PSS 参数再整定现场试验	100
4.5.1 全系统的四维留数空间	101
4.5.2 广域控制回路的能控度	104
4.5.3 所有广域控制回路对单个模式的控制作用	104
4.5.4 单个广域控制回路对所有模式的控制作用	106
4.6 本章小结	108
第 5 章 基于多信号 Prony 算法的系统留数矩阵辨识与应用	109
5.1 基于 Prony 算法的多变量系统降阶模型辨识	110
5.1.1 Prony 辨识结果与线性系统输出	110
5.1.2 应用小信号激励法进行系统传递函数辨识	111
5.1.3 系统传递函数矩阵与留数矩阵	113
5.1.4 传递函数矩阵到状态方程描述的降阶转化	115
5.2 Prony 辨识系统降阶模型的分析	118
5.2.1 Prony 辨识系统振荡模态	118
5.2.2 Prony 辨识降阶模型的能控性和能观性	119
5.3 模型校验	123
5.3.1 Prony 算法得到振荡模态	123
5.3.2 Prony 算法得到留数矩阵及能控能观指标	125
5.3.3 Prony 算法得到所有广域控制回路对单个模式的 能控性	127
5.3.4 Prony 算法得到单个广域控制回路对所有模式的	

能控性	128
5.6 基于 RTDS 的仿真实验	130
5.6.1 实验系统介绍	130
5.6.2 实验原理	132
5.6.3 实验方案及结果分析	133
5.7 本章小结	136
第 6 章 发电机组广域阻尼控制器设计	139
6.1 振荡模式的控制配置与观测配置	140
6.2 基于模式能控性指标的控制配置	140
6.3 基于模式能观性指标的观测配置	143
6.4 广域阻尼控制器的地点——信号选择标准	146
6.5 反馈信号选择方法	147
6.6 广域阻尼控制器设计	149
6.6.1 控制器参数计算	149
6.6.2 广域阻尼控制器设计过程	151
6.6.3 广域 PSS 与本地 PSS 协调控制	152
6.7 本章小结	153
第 7 章 广域 PSS 闭环控制的布点与参数整定	155
7.1 广域阻尼控制系统构架	155
7.2 控制及观测选点	157
7.3 参数整定	158
7.3.1 传递函数框图	158
7.3.2 参数整定方法	159
7.3.3 参数整定结果	160
7.4 广域 PSS 闭环控制系统的容错处理	160
7.5 本章小结	162
第 8 章 广域闭环时延的处理	163
8.1 广域闭环时延概述	163

8.2 广域闭环时延的产生及降低时延影响的策略	164
8.2.1 广域闭环时延的产生	164
8.2.2 降低时延影响的策略	166
8.3 基于预测的时延补偿广域动态闭环控制方法	167
8.3.1 PMU 装置延时	167
8.3.2 电力系统广域动态控制器部分	168
8.3.3 基于预测的时延补偿广域 PSS 闭环控制的优点	171
8.4 基于预测的时延补偿广域 PSS 闭环控制的实现方法	171
8.4.1 物理层数据通道延时特性分析	173
8.4.2 网络层数据通信协议的选择	176
8.4.3 应用层协议国内国外 PMU 通信标准差异分析	177
8.4.4 PMU 通信时滞均匀性测试	178
8.4.5 PMU 数据发送时延抖动性测试	180
8.4.6 多项式拟合预测精度及计算时间	181
8.5 本章小结	182
第 9 章 广域 PSS 控制系统通信设计	183
9.1 系统架构	183
9.2 服务器和 PMU 通信	184
9.3 服务器和 NCU 的通信	184
9.4 通信系统软件实现	187
9.4.1 采用面向对象程序设计实现	187
9.4.2 多线程并发服务器架构	188
9.5 本章小结	190
第 10 章 基于 WAMS 的广域稳定器模型	191
10.1 励磁控制器的试验接口	192
10.1.1 试验接口的接线	192
10.1.2 励磁控制器的试验接口原理	193

10.2	AVR 的运行方式	194
10.2.1	自动电压调节器 AVR	195
10.2.2	本地电力系统稳定器(LPSS)	197
10.2.3	AVR 的工作模式	199
10.2.4	通道间的跟踪	200
10.2.5	AVR 保护功能	200
10.3	励磁控制器参数设置	205
10.3.1	WPSS 控制信号参数设置	206
10.3.2	RTDS 自并励励磁系统放大倍数折算	206
10.3.3	励磁控制器励磁信号输出参数设置	207
10.3.4	励磁控制器 AVR 参数设置	207
10.3.5	励磁控制器 LPSS 参数设置	209
10.4	网络控制单元 NCU	209
10.4.1	网络控制单元功能	210
10.4.2	网络控制单元硬件平台	210
10.5	WPSS 服务器	211
10.5.1	WPSS 服务器的功能、需求和平台	211
10.5.2	WPSS 服务器操作	212
10.6	WPSS 数据采集器	213
10.6.1	WPSS 数据采集器功能、接口需求和平台	213
10.6.2	WPSS 数据采集器软件	214
10.7	本章小结	215
第 11 章	广域阻尼控制系统 RTDS 试验	217
11.1	仿真试验平台搭建	218
11.1.1	试验总体方案	218
11.1.2	广域 PSS 硬件在环试验的控制器参数	219
11.2	贵州电网广域 PSS 试验的 RTDS 模型	221
11.3	验证性试验结果分析	223

11.3.1 广域 PSS 系统调试	223
11.3.2 广域 PSS 的参数鲁棒性	230
11.3.3 投运条件测试	236
11.3.4 通信防误测试	245
11.3.5 黔北电厂为观测机组的广域 PSS 性能测试	250
11.4 本章小结	265

第三篇 基于 WAMS 电力系统的电压稳定性控制

第 12 章 基于综合灵敏度分析的电压开环控制研究	269
12.1 引言	269
12.2 基于综合灵敏度分析的电压开环控制	270
12.2.1 综合灵敏度分析	270
12.2.2 节点电压的稳定性指标	272
12.2.3 电压开环控制	273
12.3 电压开环控制模型及其求解	274
12.3.1 电压控制模型	274
12.3.2 电压控制模型的求解	274
12.4 改进遗传算法	276
12.4.1 小生境群体的动态聚类划分	277
12.4.2 适应度共享技术	278
12.4.3 改进遗传算法的步骤	279
12.5 基于综合灵敏度分析的电压稳定控制在贵州电网中的 应用	280
12.5.1 综合灵敏度分析结果	280
12.5.2 故障仿真分析	285
12.5.3 控制仿真分析	295
12.5.4 指标值仿真分析	297

12.6	基于综合灵敏度分析的电压稳定控制与 AVC 的比较	300
12.6.1	贵州电网 AVC 系统特点	300
12.6.2	电压控制策略比较	300
12.6.3	铜仁扰动仿真分析	300
12.7	本章小结	314
第 13 章	基于广域信息的动态电压闭环控制研究	317
13.1	引言	317
13.2	动态电压控制模型	317
13.2.1	基于广域信息的电力系统等效模型	317
13.2.2	动态电压控制模型	319
13.3	非线性预测控制	320
13.3.1	模型预测控制统一数学描述	320
13.3.2	非线性预测控制的主要步骤	321
13.4	动态电压控制的求解	323
13.4.1	预测电压轨迹	324
13.4.2	滚动优化求解	327
13.4.3	实现流程	328
13.5	仿真分析	329
13.6	本章小结	334
第 14 章	贵州电网电压稳定监控系统	335
14.1	系统总体功能	335
14.1.1	功能框图	335
14.1.2	结构框图	336
14.1.3	数据流程	337
14.2	数据接口方案	338
14.2.1	WAMS 主站接口	339
14.2.2	EMS 系统接口	341

14.3 贵州电网电压稳定监控系统介绍	346
14.3.1 主界面介绍	346
14.3.2 实时监测功能	347
14.3.3 系统预警功能	349
14.3.4 数据保存和浏览功能	350
14.4 本章小结	352
参考文献	355
后记	399

第一篇 基于 WAMS 的电力系统监测技术

本篇从广域监测技术入手，分三个部分阐述贵州电网广域在线监测技术及其应用。一是贵州电网 WAMS 主站功能、配置和通信构架；二是 Prony 算法的基础理论及贵州低频振荡在线监测系统实现；三是基于短路容量的电压稳定性理论及基于广域信息电压在线监测系统的实现。

- ◆第1章 广域监测系统
- ◆第2章 基于 Prony 算法的低频振荡在线监测
- ◆第3章 基于 WAMS 的电压稳定性在线监测