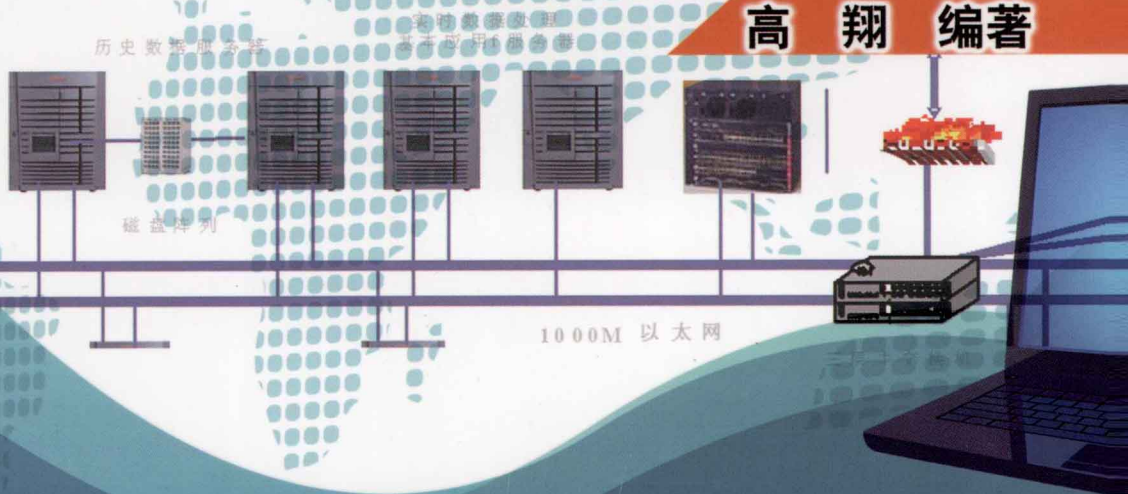


现代电网应用技术丛书

电网动态监控系统

应用技术

高翔 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电网应用技术丛书

电网动态监控系统 应用技术

高翔 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着同步相量测量技术的出现和发展,国内外都在开展基于 WAMS 的广域电网动态监测系统的研究与应用。本书全面介绍电网动态监控技术及其在国内外的应用情况,全书共分 9 章,包括概述、同步相量测量技术、电网动态监控系统架构、电网模型参数辨识、电网动态监视、电网动态安全评估、系统在线控制、系统试验、WAMS 系统应用分析。

本书可供从事 WAMS 系统研究、开发、规划和设计等工作的技术人员阅读,也可供相关电力专业院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电网动态监控系统应用技术/高翔编著. —北京:中国电力出版社, 2011.7

ISBN 978-7-5123-1965-3

I. ①电… II. ①高… III. ①电网-电力监控系统
IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 154289 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 345 千字
印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

20 世纪 90 年代以来同步相量测量 (Phasor Measurement Unit, PMU) 技术的出现, 为电网的动态监视和事故分析提供了一种新技术实现方案的可能。PMU 主要特点在于信息的实时性 (25~100 帧/s) 和带有 GPS 时钟同步标识, 由此, 对于电网运行的应用提升带来很大的想象空间。2004 年 Rehtanz 博士领导的 ABB 广域监控系统 PSG850 被 MIT 的 Technology Review 评为十大科技新进展。

1996 年、2003 年美国两次停电事故的分析, 加快了国内外对于推进基于 PMU 的广域测量系统 (Wide Area Measurement System, WAMS) 建设试点的认同度, 国内外都在以各种方式寻求基于 PMU 技术的电网安全运行控制优化解决方案。作者参与了华东电网自 2003 年起的 WAMAP 系统规划、建设过程, 针对项目实施过程中的问题形成的思考构成了本书稿的主要思路和架构。鉴于作者工作背景的特征, 本书更多地是从工程应用的视角探讨 WAMS 系统问题。

本书由九章构成: 第 1 章分析了现代电网的特征、二次控制技术发展的背景、国内外 WAMS 系统应用概况及目前电网运行监视和控制模式的现状, 提出了 WAMS 系统所应实现的主要功能: ① 模型参数校核; ② 电网动态监视; ③ 动态安全评估; ④ 电网实时控制。第 2 章介绍 PMU 的基本概念、数据特点、数据采集技术、传输规约特征、参数配置、误差分析及不同安装模式对于应用的影响等。第 3 章分析了 WAMS 系统的组成结构, PMU 装置信息的特点、基于应用的布点原则, 主站 PMU 数据处理的特点和基本思路等。第 4 章讨论了基于 PMU 的电网模型参数辨识基本思路。第 5 章阐述了电网扰动动态监视的各种应用, 分析了 PMU 数据特征对于监视电网扰动的应用价值。第 6 章介绍了电网动态安全分析的基本计算工具, 讨论了利用 PMU 实现电网安全动态评估的思路。第 7 章分析了利用 PMU 实现在线优化控制的技术和典型应用场景。第 8 章描述了 PMU 试验的基本要求及测试方法。第 9 章从经济、技术的视角分析了 WAMS 系统的效用, 提出了应关注的关键性问题, 展望了系统未来应用的发展趋势。

WAMS 系统工程应用最大的问题之一, 即 PMU 的布点问题, 在智能变电站技术发展过程中有可能获得更合理的解决方案, 智能变电站信息的最大特点在于“全站、唯一、同步、标准”, 因此, 将获得 PMU “无处不在”的效果。在浙江 500kV 兰溪变电站的智能化改造工程中已经在试点应用“三合一”装置, 即网络报文、故障录波、PMU 集成型装置。这种类型的装置具备信息可配置功能, 可以根据电网动态监测需要灵活配置 WAMS 系统所需要监测的信息。这样, 将大大节省 WAMS 系统的建设投资。

WAMS 相关技术的发展和应用情况日新月异, 仅希望以本书作为一种系统建设的体会与业内同仁共同探讨, 并恳请同行对于书稿中的不当之处不吝赐教。

作者

2011 年 3 月于上海



目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 技术背景	1
1.1.1 现代电网特征及发展特点	1
1.1.2 电网运行控制技术特征	2
1.2 国内外应用情况概述	2
1.2.1 国内应用情况	3
1.2.2 国外应用情况	5
1.3 电网运行控制系统现状	8
1.3.1 SCADA/EMS	8
1.3.2 其他应用系统	9
1.4 电网动态监控系统的主要功能	10
1.4.1 WAMS 体系结构	10
1.4.2 WAMS 主要功能	13
1.5 小结	15
参考文献	15
第2章 同步相量测量技术	17
2.1 基本概念	17
2.1.1 基本术语	17
2.1.2 相角基本概念	18
2.1.3 相角与频率的测量原理	21
2.2 GPS 技术	22
2.2.1 GPS 概述	23
2.2.2 GPS 信息应用	23
2.2.3 GPS 误差分析	27
2.3 PMU 结构及测量原理	27
2.3.1 实时信息采集	28
2.3.2 通信规约及数据传送	29
2.3.3 频率变化的影响	32
2.4 PMU 的应用	33
2.4.1 PMU 误差分析	33

2.4.2 参考相量选择	34
2.4.3 PMU 应用规范	38
2.4.4 PMU 的安装	43
2.5 小结	44
参考文献	44
第 3 章 电网动态监控系统架构	46
3.1 WAMS 系统的构成	46
3.1.1 WAMS 系统组成	46
3.1.2 PMU 信息特征	48
3.1.3 系统主要应用	49
3.2 系统的布点原则	53
3.2.1 暂态安全监视	53
3.2.2 电压监视	53
3.2.3 频率监视	53
3.2.4 低频振荡	54
3.2.5 可观测性	54
3.2.6 重要输电断面	55
3.3 系统的平台技术	55
3.3.1 PI 数据库特点	56
3.3.2 系统信息处理	59
3.3.3 系统运行监视	62
3.3.4 系统信息整合	63
3.4 系统的可视化技术	66
3.4.1 系统的信息模型	66
3.4.2 可视化功能	66
3.5 小结	69
参考文献	70
第 4 章 电网模型参数辨识	71
4.1 电网模型与仿真计算	71
4.1.1 模型参数辨识概述	71
4.1.2 电网模型参数辨识	73
4.1.3 仿真计算的主要特点	82
4.2 基于 PMU 的模型参数辨识	83
4.2.1 PMU 与仿真的相似度评价准则	83
4.2.2 基于 PMU 电网参数辨识的基本应用	84
4.2.3 PMU 数据与仿真数据的接口	94
4.3 基于 WAMS 的模型校核	95

4.3.1	模型参数校核必要性	95
4.3.2	模型参数校核的应用	96
4.4	小结	98
	参考文献	99
第 5 章	电网动态监视	101
5.1	电网扰动判别	102
5.1.1	典型扰动的一般规律	102
5.1.2	扰动的特征分析	102
5.2	功角监视	104
5.2.1	同步功角定义	104
5.2.2	同步功角测量	105
5.2.3	同步功角监视	107
5.3	电压监视	109
5.3.1	电压失稳机理	110
5.3.2	电压监视目标	111
5.4	频率监视	112
5.4.1	频率分布特征	112
5.4.2	电网频率响应系数实测	113
5.4.3	机组一次调频监视	113
5.4.4	机组二次调频监视	114
5.5	输电线路监视	115
5.5.1	线路热容量监视	115
5.5.2	线路稳定限额监视	116
5.6	低频振荡监视	117
5.6.1	低频振荡机理	117
5.6.2	低频振荡监视的实现	117
5.7	小结	119
	参考文献	119
第 6 章	电网动态安全评估	121
6.1	状态估计的应用	121
6.1.1	状态估计基本概念	121
6.1.2	PMU 优化状态估计的应用	122
6.1.3	PMU 优化状态估计的相关问题	126
6.2	常用电力系统稳定分析软件	126
6.2.1	EMTDC/PSCAD 分析软件	126
6.2.2	SSAT 分析软件	127
6.2.3	TSAT 分析软件	128

6.2.4	VSAT 分析软件	130
6.2.5	FASTEST 分析软件	131
6.2.6	PSD 分析软件	132
6.2.7	PSASP 综合程序	133
6.3	电网动态安全评估	133
6.3.1	动态安全评估概述	133
6.3.2	频率暂态稳定性评估	137
6.3.3	低频振荡模式识别	139
6.3.4	传输通道电压稳定性评估	141
6.3.5	全网电压稳定性评估	143
6.4	小结	145
	参考文献	145
第 7 章	系统在线控制	150
7.1	PSS 的全局调制	150
7.1.1	PSS 基本原理	150
7.1.2	PSS 就地控制模式	153
7.1.3	广域 PSS 应用模式	153
7.2	暂态稳定预测控制	154
7.2.1	基于 PMU 暂态稳定预测控制的基础	154
7.2.2	暂态稳定预测控制理论研究	155
7.2.3	基于 PMU 的暂态稳定控制实现	156
7.3	广域保护应用	162
7.3.1	广域保护的基本概念	162
7.3.2	广域保护的基本特点	163
7.3.3	广域保护的主要实现	165
7.4	统一潮流控制器 UPFC	170
7.4.1	UPFC 基本原理	170
7.4.2	UPFC 就地控制模式	171
7.4.3	UPFC 集中控制模式	171
7.5	小结	174
	参考文献	174
第 8 章	系统试验	176
8.1	试验方案	176
8.2	性能试验	177
8.2.1	试验目的	177
8.2.2	静态性能试验	177
8.2.3	动态性能试验	180
8.2.4	触发性能试验	181

8.3 同步性试验182

8.3.1 试验目的182

8.3.2 试验方法182

8.3.3 试验内容182

8.4 规约测试183

8.4.1 试验目的183

8.4.2 试验方法及接线183

8.5 PMU 与主站数据传输测试183

8.5.1 试验目的183

8.5.2 传输延时试验183

8.6 一致性试验184

8.6.1 试验目的184

8.6.2 试验方法184

8.7 现场试验185

8.7.1 试验目的185

8.7.2 接线正确性试验185

8.7.3 功能试验185

8.7.4 网络联结试验186

8.7.5 规约测试186

8.7.6 通信实时性检查187

8.7.7 数据格式检查188

8.8 小结188

参考文献188

第 9 章 WAMS 系统应用分析189

9.1 主要应用系统介绍189

9.1.1 华东电网的 WAMAP 系统189

9.1.2 华北电网的 WAMS 系统192

9.1.3 河南电网的 WAMS 系统195

9.1.4 美国西部电网 WACS 系统196

9.1.5 美国东部电网 RTDMS 系统198

9.2 电网动态监控系统效用分析203

9.2.1 经济分析203

9.2.2 技术分析204

9.3 WAMS 系统应用展望205

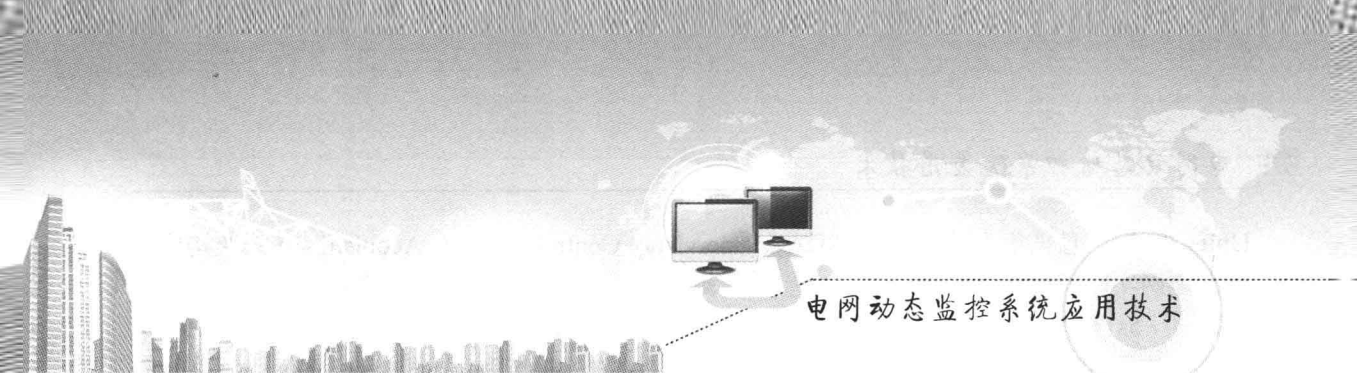
9.3.1 系统建设应注意的问题205

9.3.2 系统应用的阶段性209

9.3.3 系统未来发展趋势211

9.4 结论219

参考文献219



第 1 章

概 述

20 世纪 90 年代以来,以同步相量测量技术(Phasor Measurement Unit, PMU)为应用标志的广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)在国内外电网中得到了不同类型的试点应用,随着现代化大电网技术的发展,基于 PMU 技术的电网动态监视、控制系统研究已成为电网实时动态安全分析、控制技术领域的发展热点。本章主要介绍基于 PMU 技术的电网动态监控系统应用的技术背景、国内外系统的应用概况,以及系统所能实现的主要功能等。

1.1 技 术 背 景

1.1.1 现代电网特征及发展特点

现代电力系统的主要特征体现为大机组、大电厂、大电网、超(特)高压远距离交直流混合输电,这标志着电力系统的发展水平已经进入一个新的阶段,未来的电力系统将会表现出一些较小规模电力系统所不具备的新特性。同时,电网运行采用了大量新型控制技术,如发电机励磁及调速系统、动态无功补偿装置、可控串补、高压直流输电控制系统等,使电力系统的动态特性日趋复杂。

与此同时,随着电力市场进程,环境保护的要求,电网的建设尤其是输电通道的建设越来越困难,使得电网的各种设施不得不以接近运行极限的方式运行,电网动态稳定问题越来越突出,如何更有效地发挥现有电力设施的效用已成为迫在眉睫的问题。而电网一次系统特性发生改变时,电网的运行监视、控制手段必须能够适应这一变化。

近年来国外连续发生的多次大停电事故,如 1996 年 7 月 2 日和 8 月 10 日两次美国西部大停电、2003 年“8·14”美加大停电、2006 年“11·4”西欧大停电等,这些事故表明尽管现代电网的一次系统结构已相当坚强,依旧不能避免各种原因引起的大停电事故。对于典型大停电事故分析表明,事故过程中继电保护、自动控制装置和调度人员未能很好地协调配合是造成连锁故障发生的重要原因。因此,需要研究新的电网运行控制系统架构,以便准确地判断电力系统的异常状态和预测其发展趋势,及时采取有效的协调控制措施,避免单一事件引起的连锁事故发生,有效地避免大停电事故的发生。

然而,现代电力系统的许多特性和事故发生发展过程的机理还没有完全被人们认识清楚,尚未找到有效的保证系统安全稳定运行的方法和对策。传统上以 RTU(Remote Terminal



Unit)/测控信息采集为基础的 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 系统构成了传统电网实时调度运行系统的主体。受 RTU/测控的采样频率和传输模式的限制,一般 SCADA 信息 4~5s 刷新一次,即 SCADA 系统所表征的是电网若干秒前的系统状态;基于 SCADA 的状态估计 SE (State Estimation) 和静态安全分析 SA (Stability Analysis) 基本上 5~10min 计算一次,即 SE 和 SA 所反映的结果是数分钟前的系统状况。因此,SCADA/EMS (Energy Management System) 为应用标志的调度自动化系统并不能反映系统动态变化特征,不足以捕获系统动态变化过程,不能满足电网动态监视与评估的要求。需要有新的技术方法和新的技术手段,准确测量和记录电力系统各种运行状态及其变化,以便分析电力系统的运行特征,为理论研究提供可信的原始数据,并对研究成果的有效性进行验证。

1.1.2 电网运行控制技术特征

现代微电子技术和信息技术的发展使得保护装置、测控装置、安全自动装置、故障录波器、PMU 等电力系统二次控制系统的智能电子设备 IED (Intelligent Electronic Device) 设备大量采用了 DSP、滤波算法、总线不出芯片等技术,大大改善了信息采集、处理的精度,提高了数据处理的有效性和装置的抗干扰能力。

20 世纪 90 年代以来电力通信网络得到了快速发展,光纤和数字微波已构成传输网的基础,准同步数字系列 PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) 传输机制逐渐向同步数字系统 SDH (Synchronous Digital Hierarchy) 转化。现代通信网正逐步向宽带高速、数字化、综合化、智能化方向发展。“网络基础光纤化、网络传输宽带化、网络交换分组化、网络同步一体化”已成为一种现代通信应用技术的标志。通信网络的建设为信息传输提供了可靠的平台,使得信息传输的实时性和可靠性大大提高。

因此,以现代信息处理技术和网络通信为基础的调度自动化系统进入一个全新的发展时期。基于信息采集和控制的 IED 装置、电力通信网络及设在电网调度中心的运行、分析主站构成了电力系统监测、控制系统或称为电网调度自动化系统的基础。随着信息技术的发展,电力调度数据网络的建设,这些装置、系统组成的电网运行监测和控制系统构成了电力系统运行的中枢神经和重要的技术支撑,是电力系统安全稳定运行的重要保障,并将在电网的安全运行中起着越来越重要的作用。

基于同步相量测量技术的电网动态监控系统正是在此背景下产生,近年来已经成为现代电力系统监测和控制领域研究热点,2004 年 Rehtanz 博士领导的 ABB 广域监控系统 PSG850 被 MIT 的 Technology Review 评为十大科技新进展,这标志着以 PMU 技术为基础的电网动态监控系统将在未来电网运行控制技术中发挥极其重要的作用,并且随着电网动态安全分析理论、技术手段的进步与发展有可能在此基础上建立电网协调控制安全预警系统。

1.2 国内外应用情况概述

基于 PMU 的应用研究可以追溯到 20 世纪 80 年代中期。GPS 技术的出现使得观测电网不同点的相角成为可能,最早在电力系统采用 GPS 技术是用于雷电故障定位。由于 PMU 可以直接获取电网关键点实时的功角、电压、频率变化信息,因此,有可能描述电网的动态变化现象,实现电网运行监视、协调保护、控制的功能实现,同时,可以验证离线仿真计算工具模型和计算结果。



1.2.1 国内应用情况

我国基于 GPS PMU 及广域监控系统的研究工作起步于 20 世纪 90 年代中期,先后在黑龙江电网、华东电网、江苏电网等地开始试点应用。系统应用基本可以分为两个阶段:第一阶段的主要特征是就地站的信息采集装置采用专用的厂家协议、利用 GPS 技术实现数据采集的同步,数据传输基本通过 Modem 方式实现,传输通道为数字微波通道;第二阶段 PMU 装置采用标准协议,传输通道为数据网。以下将简单介绍国内典型系统的应用情况。

一、黑龙江电网区域稳定控制系统

黑龙江电力公司与清华大学 1996 年合作研制了电力系统动态监测装置, 1997 年 3 月黑龙江东部网区域稳定控制系统开始运行。系统由安装于黑龙江东部网 5 个主力厂站的综合稳定监测、控制子站系统构成, 各子站均装有 GPS 接收器, 用于进行全网各监测站点的同步数据采集, 并在子站之间进行实时数据传输, 可在子站获得本地及对端电压的相量表示二者之间的相角差, 在变电站端测得有故障发生且判定该故障将引起电网失稳时, 向发电厂端发送远方切机命令, 系统示意图见图 1-1。

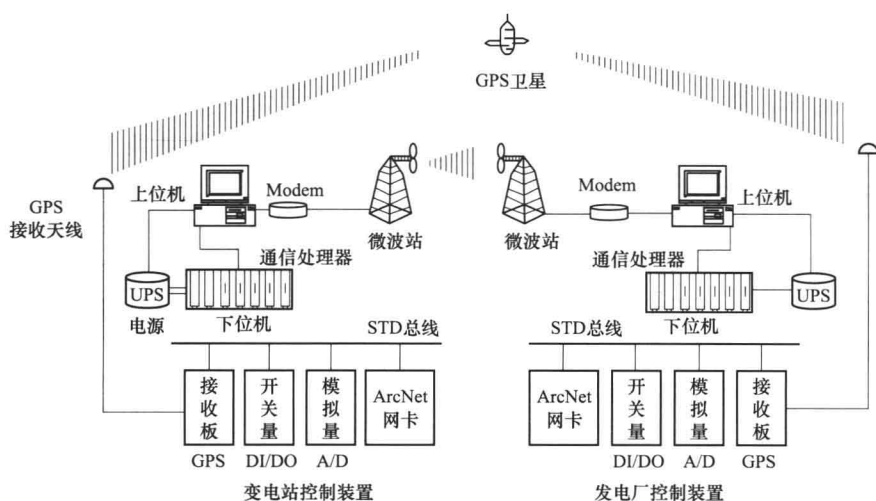


图 1-1 黑龙江电网区域稳定控制系统示意图

为了实现数据传输和远方切机命令传输的功能,每个子站的数据采集、处理与微波收发信机音频接口之间,配置有多通道通信前置处理器及调制解调器,通信前置处理任务由插在上位机里的智能式多通道通信控制卡完成。通信卡采用 DSP 技术开发,作为数据终端设备的通信前置处理部件,一方面通过 PC 总线与上位机连接,另一方面通过数据电路终端设备连接微波中继信道的音频接口,完成本端电站与对端多电站之间的双向实时数据传输任务。

二、华东电网实时功角监测系统

1999 年华东电网基于 ADX3000（智能型系统稳定性监录仪）的实时功角监测系统投入运行，系统采用由中国电力科学研究院系统所与欧华科技有限公司（台湾）联合推出的集成系统。厂站数据采集装置是 ADX3000 智能型系统稳定性监录仪，具备故障录波器的功能。调度端的设备主要由中央监控站、数据服务器和资料分析站构成，中央监控站将画面传输到大屏幕驱动器上，在调度室的大屏幕显示器上显示醒目的实时功角画面，系统结构图如图 1-2 所示。

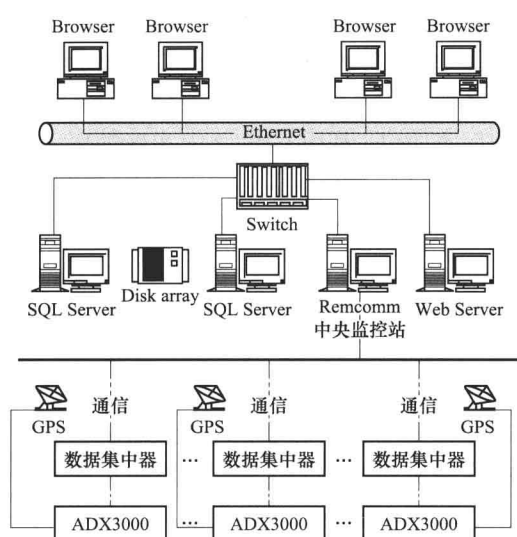


图 1-2 华东电网实时功角监测系统结构图

华东电网实时功角监测系统主要是进行功角的监视和告警，虽然 ADX3000 具备故障录波器的功能，但为了保证必要的测量精度，所有的现场监测对象均接入电气测量回路。

ADX3000 现场数据采集装置以 1200 次/s 的速率进行交流采样，向调度端传输 20 帧/s 组功角数据。中央监控站显示屏幕每秒同步刷新一次数据，对过去 10s 内的功角测量值进行频谱分析。为保证功角数据和频谱分析在调度端反映的实时性，调度端与现场数据采集装置的通信速率不能低于 9600bit/s。当时三个厂站均不能实现网络通信，而常规远动的 FSK 制式 Modem 无法胜任这个通信速率，系统的调度端和厂站端均采用 MultiTech 公司生产的 Modem，以 14 400bit/s 的速率进行功角数据传输。在专线的上音频带宽上

实现这样高的通信速率，在华东电网的实时监测系统上运用尚属首次。

整套系统能实时在线监测华东电网系统的送电端和受电端的功角摆动及潮流变化情况，捕捉系统低频振荡信息资料。2001 年 5 月 16 日晚 19 时 49 分至 53 分安徽电网局部地区发生了低频振荡，当时的 500kV 及 220kV 电压未见异常、系统频率未低于 49.90Hz，系统内所有的保护装置均未动作，安装于平圩发电厂的功角数据采集装置真实而详尽地记录下了在这个过程中 1 号机机端电压、电流的变化，为事后的稳定分析提供了极为宝贵的现场真实数据。

三、江苏省广域测量实时监测系统

2003 年江苏省电力公司与四方同创公司及清华大学合作研制基于 PMU 的广域监测系统，现场的 PMU 采取 IEEE1344 协议，通信网络采取电力专用数据网 SPDNet，端到端的传输延时小于 100ms。主站功能结构示意图见图 1-3，系统结构图见图 1-4。

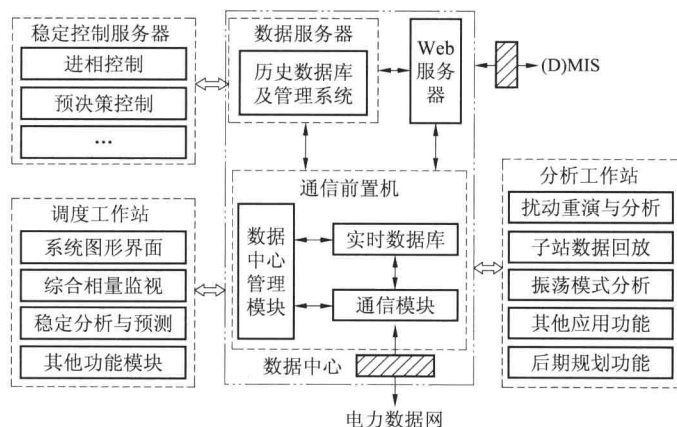


图 1-3 主站功能结构图

随着技术的进步和发展,其他地区也陆续建立了基于 PMU 的电网监视系统或对现有系统进行升级,如华东电网 WAMAP 系统、华北电网 WAMS 系统、河南电网 WAMS 系统等,这三个系统的情况详见第 9 章。

此外,国家电力调度通信中心在阳城工程、全国联网工程工程、三峡工程等工程中部分安装了 PMU,拟进一步全面安装构成系统;广东、辽宁、河北、四川等电网也安装了 WAMS 系统。

1.2.2 国外应用情况

国外对 WAMS 的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代初,80 年代中期美国能源部组织开展了同步相量应用研究,1982~1986 年处于概念阶段,1986~1988 年处于试验装置阶段,1988~1991 年处于系统中试运行阶段。Macrodyne 博士在 Virginia Tech. (弗吉尼亚理工)研制了 48 点/周的同步相量测量装置,1992 年以后工业化产品问世,当时的采样频率达到 2880Hz,16 位 A/D。

一、美国 WAMS 系统应用

1992 年北美开始了基于 GPS 同步测量系统的 PMU 应用,1995 年美国西部电网 WSCC (Western Systems Coordinating Council) 的 BPA (Bonneville Power Administration) 电力公司和西部电力公司 WAPA (Western Area Power Administration),在能源部和美国电科院的支持下开始实施 WAMS 项目,在 1996 年 7 月 2 日和 8 月 10 日两次西部大停电事故中,WSCC 的 PMU 为北美 1996 年大停电事故分析提供了宝贵的动态数据,促进了 WAMS 概念的推广。2003 年“8·14”美加大停电又推进了 WAMS 的建设,WSCC 的 WAMS 在几次大的事故中也都记录了非常有价值的数据库。

目前美国西部电网 WSCC 电网 ISO^① (包括 BPA, SCE^②) 建立了美国规模最大的 WAMS 系统,2005 年 12 月安装了 56 台 PMU,其中 50 台与实时监控系统联结。美国的许多其他电力公司都安装了 PMU,少则 2 台、多则 10 多台。其主要功能是实时连续测量监视和记录事件,具有很强的分析建模功能,可以识别电网暂态响应的模式、识别电网降阶线性模型参数、电网每个动态子系统或分量的参数。2003 年“8·14”大停电后美国启动了东部电网动态监视系统建设项目 EIPP (Eastern Interconnection Phasor Project),以期通过广域监测控制系统的建设,提高东部电网互联系统的可靠性,成立了由电力用户、软硬件制造商、可靠性协会和政府部门组成的六个工作组,研究系统的定义、软硬件的功能规范等。美国东、西部电网的系统情况见第 9 章。

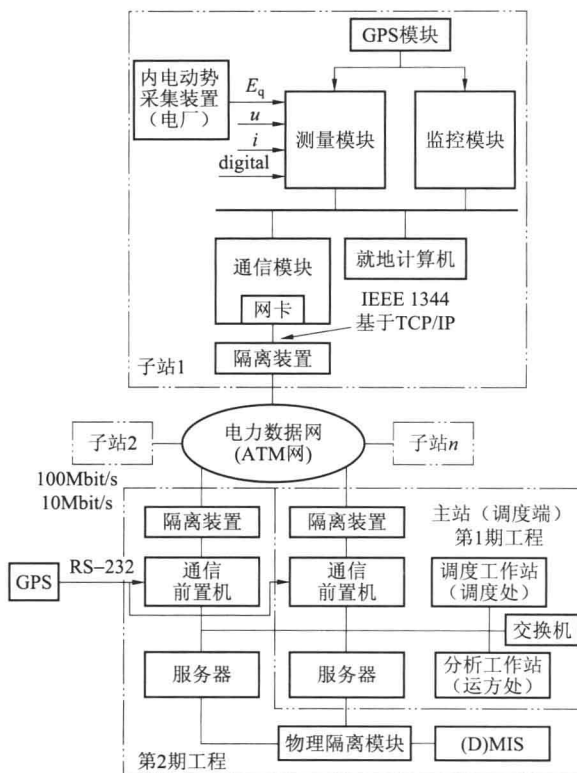


图 1-4 江苏电网 WAMS 系统结构图

① ISO——独立系统运营者。

② SCE——Southern California Edison, 加州爱迪生电力天然气公司。



二、加拿大电网 WAMS 系统

2004 年加拿大魁北克水电局 (Hydro-Quebec) 建成了 8 个 PMU 构成的 WAMS 系统, 见图 1-5, 探索了利用 PMU 的量测信息实现 PSS、二次电压协调控制等应用。计算分析结果表明: 通过优化发电机的 PSS 设定值可以有效地提高系统的暂态稳定裕度; 本地控制增加增益可以有效地改善互联电网的阻尼, 但会对于暂态稳定裕度产生不利影响。基于广域测量系统的二次电压控制具有巨大前景, 可以大幅提高输电网的传输功率和无功储备, 本地控制和广域控制的差异是非常大的, 在功率传输方面可以提高 70% 效率, 在无功储备方面可以提高 50%。

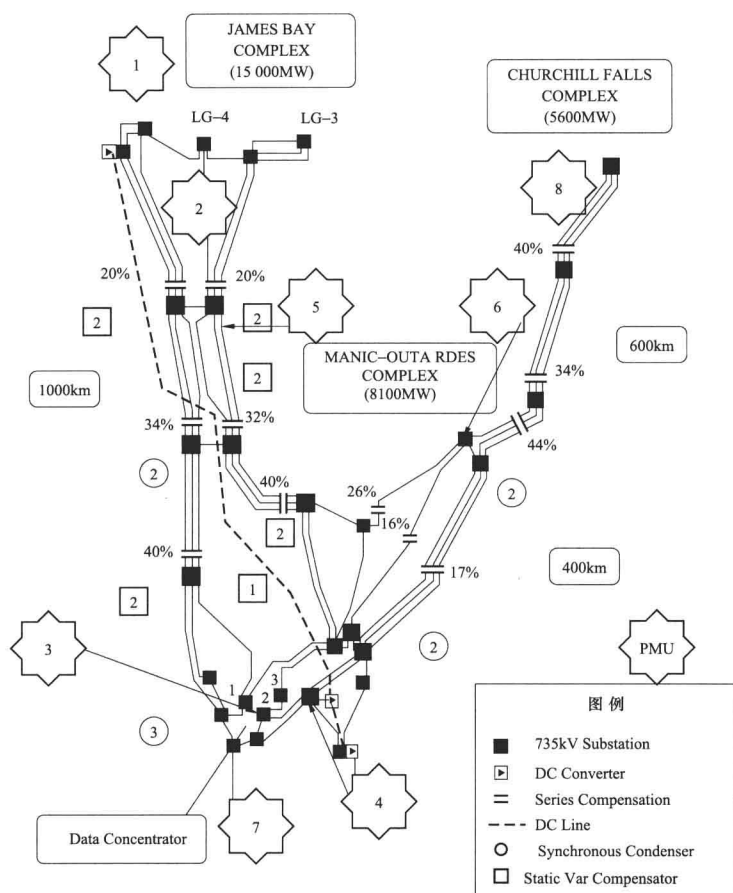


图 1-5 加拿大北部电网 WAMS 系统示意图

三、巴西 WAMS 系统

2003 年巴西开始在南部电网开始建设由三个厂站端 PMU 构成的动态监视网, 整个系统由三个 PMU 和一个 PDC 组成, 通信网络采用 Internet 网络, 传输协议采用 UDP/IP, 传输延时约 130ms。三个 PMU 分别安装在巴西南部的三个大学实验室, 数据传输到设在 Federal University of Santa Catarina 实验室的 PDC 装置中。

经测试, 对于电压幅值 10%~120% 之间的变化, PMU 量测幅值误差小于 0.35%; 相角误差小于 0.1°; 频率在 55~65Hz 之间变化时, 幅值误差小于 0.025%。

监视系统取低压侧的量测信息，在巴西电网 2005 年 10 月 4 日 750kV 电网发生故障跳闸后，记录了相关的扰动信息，见图 1-6、图 1-7。当时 20:40 750kV 系统跳闸，巴西南部网、东南西南网解裂，引起 13 台发电机共 6920MW 容量失却；低频减载动作切除 2852MW 负荷。整个事件中从图 1-6 可以看出，20:40:26 频率开始降低，20:40:30 频率降到最低点 58.25Hz，20:40:33 频率开始恢复，20:43:33 系统频率恢复到 59.6Hz，20:56 系统频率恢复正常。

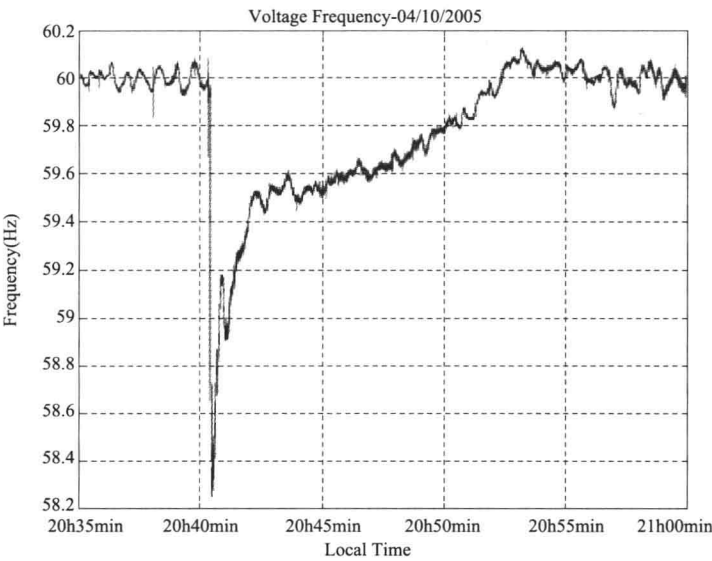


图 1-6 巴西南部电网三个不同 PMU 所记录的频率信息

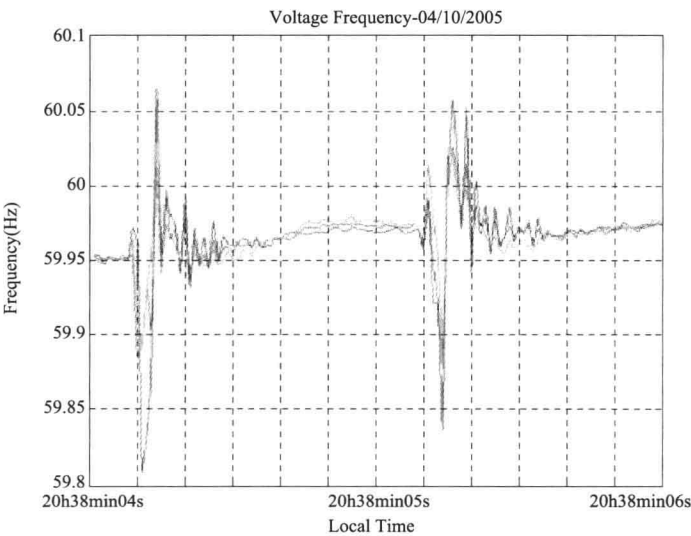


图 1-7 巴西南部电网三个不同 PMU 所记录的扰动时的频率特性图

四、日本 WAMS 系统

日本电网最早在六大电力公司所属的六个高等院校中分别安装了 PMU 装置，装置通过实验室 100V 交流电源获取电网电压、相角信息，用于记录电网的动态扰动信息。随后在 8



个超高压变电站、3 个电厂中安装了基于 GPS 的数据采集系统 DAS (Data Acquisition System), 主要实现以下功能: ① 进行电网参数动态辨识, 如线路参数等, 并用于状态估计的优化; ② 电网谐波监测, 分析电网的谐波特征; ③ 集中式广域后备保护实现方案; ④ PSS 和电压控制性能验证; ⑤ 发电机阻尼测试; ⑥ 电网动态性能监视。系统采用 64K 数据通道。

五、北欧 WAMS 系统

北欧地区的电网特征是北电南送, 由于电力放松管制、环境保护等因素的影响, 输电网络的发展受到很大限制, 输电线路和发电机裕度越来越小。因此, 为了建立电网动态扰动的可靠监视、快速响应、准确控制机制, 在若干个地点安装了 PMU, PMU 采取 ISDNModem 进行信息调用, 挪威电网中主要用于改善状态估计精度和电压稳定; 冰岛电网中主要用于检测低频振荡; 瑞典电网中用于监视电气化铁路运营引起的电气量变化。

六、韩国 WAMS 系统

2002 年 9 月韩国建设了基于 PMU 的动态监视和评估系统, 主站分为前置部分、数据库部分、动态评估客户端, 前置部分接收来自厂站端基于 GPS 的 10Hz 实时信息, 并存入数据库服务器, 数据传送规约采取 TCP/IP 和 UDP/IP, 传输媒介采取 T1 级的专用光纤; 数据库服务器接收来自前置部分和 EMS 的信息。

正常情况下厂站端的装置提供系统电压、相角、功率等信息, 数据库服务器保留来自前置部分的两分钟数据。电网发生故障时前置部分切换至扰动数据记录模式, 每次扰动记录扰动前 2min, 扰动过程 18min 的数据, 以确保事故后长过程稳定分析所需的数据量。同时, 预先设置系统母线电压之间相角差或低频振荡判断值作为扰动模式的触发依据。

主站系统的主要功能: ① 系统稳定的早期诊断; ② 扰动数据记录; ③ 基于控制的快速响应。离线分析表明, 韩国电网暂态稳定和电压稳定问题不突出, 低频振荡情况比较突出, 因此, 选择了 24 个厂站安装 PMU。主要目标是实现动态监视和仿真模型的校核。

此外, 瑞士 WAMS 的应用在传输走廊监视、电压稳定评估、振荡评估等方面取得良好的效果。2004 年, 墨西哥开始建设 WAMS, 到 2006 年共有 34 个 PMU, 用来进行扰动监测、模型验证、控制参数整定等工作。2005 年意大利 ISO 开始建设 TERN WAMS 系统, 总共装有约 30 个 PMU, 在罗马设置一个控制中心实现自动报警、在线频域分析、模态分析和同调区域监测等。

1.3 电网运行控制系统现状

1.3.1 SCADA/EMS

目前电力系统实时监测和控制系统或称为调度自动化系统主要指 SCADA/EMS 系统, 是以计算机技术为基础的现代电力调度自动化系统, 主要为电网调度运行人员提供电网各种实时信息, 如频率、发电机功率、线路功率、母线电压等, 并对电网进行调度决策管理和控制, 保证电网安全运行, 提高电网质量和改善电网运行的经济性。

SCADA 系统是 EMS 系统的基础模块, 其信息来源于变电站、发电厂的 RTU, 主要完成数据的收集、处理解释、存储和显示, 并把这些实时信息传递给其他应用模块。其主要功能: