



国家电网公司
电力科技著作出版项目



电力系统 同步相量测量 技术及应用

张道农 主 编 于跃海 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力系统 同步相量测量 技术及应用

张道农 主 编 于跃海 副主编

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着超大规模电网的不断联网及智能电网建设的不断推进,对电网安全稳定运行的要求越来越高,基于同步相量测量装置构建的广域相量测量系统将大大提升电力系统动态安全稳定的监测与控制能力,是国内外公认的最新电网监测与控制手段之一。

电力系统同步相量测量技术,解决了同步相量测量装置的研发、生产、规划布点与优化、推广应用等技术问题,解决了广域相量测量系统的接入、运行控制等技术问题。近年来,该技术在国内外得到了迅速的发展,成为大电网运行监视的重要支撑技术。

本书系统论述了同步相量测量技术、广域相量测量技术、电网监视技术及其典型工程应用。全书共 10 章,分别介绍了相量测量技术,广域相量测量系统子站、主站、通信协议,电网模型参数辨识,电网动态安全评估,广域相量测量系统及时监视与分析,广域后备保护与在线控制,一致性测试与验证等方面的内容。

本书兼具理论参考价值与工程实践价值,既可作为电力系统自动化专业高校师生的参考书,也可为电力系统自动化专业的科研人员、技术管理人员、规划设计人员、运维人员、检测人员提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统同步相量测量技术及应用/张道农主编. —北京:中国电力出版社,2017.11(2018.3重印)

ISBN 978-7-5198-1373-4

I. ①电… II. ①张… III. ①电力系统-相量测量 IV. ①TM933.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 289389 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:马 青(010-63412784, 610757540@qq.com)

责任校对:常燕昆

装帧设计:张俊霞 张 娟

责任印制:邹树群

印 刷:北京雅昌艺术印刷有限公司

版 次:2017 年 12 月第一版

印 次:2018 年 3 月北京第二次印刷

开 本:710 毫米×1000 毫米 16 开本

印 张:19.25

字 数:357 千字

印 数:1001—3000 册

定 价:116.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

《电力系统同步相量测量技术及应用》

编写组名单

主 编 张道农

副主编 于跃海

参编人员	时伯年	段 刚	许 勇	温富光
	陆进军	谢晓冬	丁 磊	王 宾
	张小易	侯明国	江 浩	袁明军
	王 亮	李 强	裴茂林	李劲松
	毕天姝	刘 灏	周 捷	鲍颜红
	陈 峰	王 波	施玉祥	杨文平
	黄 鑫	杜奇伟	章立宗	陈 宏
	邢晓刚	曾 飞	李东升	陈 静
	王英涛	蒋宜国	王永福	李 金
	沈 峻	黄少雄	丁津津	景柳铭
	张建伟	赵景峰	李学聪	李圆智
	朱晓鹏	房树超	郑明忠	李力华

前言

电力系统同步相量测量技术,是基于同步相量测量装置(PMU)的数据采集,通过广域相量测量系统(WAMS)对电网实施运行监测与控制的技术,补充了电力调度自动化数据采集和控制(SCADA)系统与能量管理系统(EMS)应用的数据类型(实时动态数据),实现了对大规模电力系统的精确控制,提高调控中心监视电网运行的能力,提高了电网的运行可靠性;解决了同步相量测量装置的研发、生产、规划布点与优化等技术问题,接入 WAMS,使得 WAMS 对电网实施精确控制成为可能。近年来,该技术在国内外得到迅速的发展,成为大电网运行监视的重要支撑技术。

WAMS 系统由于采用同步相量测量装置(PMU)的数据,实现了广域同步、快速采样,更真实地反映了实时运行的电力系统,为电力系统安全稳定运行监测和控制提供了新的决策依据,被广泛应用于解决电网低频振荡在线分析、识别振荡源、识别振荡助推源等应用场合,是电力系统自动化解解决电网稳定问题新的前沿技术之一。

目前我国电力调控系统中,省公司以上调控中心均建设了 WAMS 主站系统,大部分 220kV 以上电压等级的变电站和电厂都安装了 PMU 装置,积累了大量的实践数据和经验,WAMS 和 PMU 技术还在不断的发展中,未来 WAMS 系统将与调度主站系统、故障信息系统融合,成为全面监视电网运行状态及数据的工具。

《电力系统同步相量测量技术及应用》系统地论述了 PMU 技术、WAMS 技术、电网实时监测技术及相关典型的工程应用。第 1 章绪论,描述了同步相量测量技术发展历程及现状,支撑同步相量测量技术的时间同步技术及全书各章的内容;第 2 章相量测量技术,论述了相量表示、测量算法及提高测量精度的方法;第 3 章广域相量测量系统子站,论述了子站系统的结构、设备、功能、布点优化与工程实施;第 4 章广域相量测量系统主站,论述主站系统的架构、前置通信、时间序列数据库及各类应用功能;第 5 章广域相量测量系统通信协议,论述了主站与子站之间、子站与站内监控系统的通信方式、通信规约;第 6 章电网模型参数辨识,论述了基于 WAMS 的电网建模及输电线、发电机、变压器、负荷的参数模型辨识方法;第 7 章电网动态安全评估,论述了电网电压稳定、功角稳定及动态安全综合评估方法;第 8 章广域相量测量系统实时监测与分析,论述了低频振荡监视、在线扰动识别、混合状态估计等方法,以及同步相量测量装置在风电

场监控、配网故障识别中的应用；第9章广域后备保护与在线控制，论述了基于PMU的广域后备保护系统、广域阻尼控制、直流协调阻尼控制、暂态稳定预测与控制、风电场功率控制及技术展望。第10章一致性测试与验证，论述了WAMS主站功能测试、子站功能测试、通信协议一致性测试技术，并介绍了同步相量测量技术专用的PMU测试仪。

为方便热爱同步相量测量技术的人员了解该技术的国内外发展现状，中国电力出版社组织编写和出版该专著，该书编写人员都是国内WAMS和PMU技术领域的专家，有扎实的理论基础和丰富的实践经验，同时也是该技术领域的国家标准和行业标准的主要起草人，与国内外同行保持着广泛的技术交流与合作。该书内容完整，条理清楚，技术全面，兼具理论参考价值与工程实践价值，既可作为电力系统自动化专业高校师生的参考书，也可作为电力系统自动化专业的科研人员、技术管理人员、规划设计人员、运维人员、检测人员提供参考。

编者对关注本书出版的国网电力科学研究院原副总工程师、全国电力系统管理及其信息交换标准化技术委员会（SAC/TC82）原主任委员刘国定先生和中国电力科学研究院厂站自动化及远动室原主任、SAC/TC82委员、中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会远动及厂站自动化专业副主任陆天健先生表示感谢！

最后，欢迎读者对本书的疏漏之处给予批评指正！

编 者

2017年11月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 相量测量技术发展历程	1
1.2 国内外相量测量技术应用现状	4
1.3 时间同步与授时技术	8
1.4 本书章节内容安排	9
1.5 小结	12
参考文献	12
第 2 章 相量测量技术	14
2.1 相量概念及表示方法	14
2.2 相量测量算法	20
2.3 频率及频率变化率算法	23
2.4 功率算法	24
2.5 提高相量测量精度的方法	26
2.6 发电机功角测量	31
2.7 次同步振荡成分检测算法	34
2.8 小结	37
参考文献	38
第 3 章 广域相量测量系统子站	41
3.1 子站结构	41
3.2 子站设备	42
3.3 子站功能	48
3.4 子站工程实施	54
3.5 子站布点优化配置	56
3.6 小结	64

参考文献	65
第 4 章 广域相量测量系统主站	67
4.1 主站系统架构	67
4.2 前置通信系统	72
4.3 时间序列数据库	77
4.4 动态信息交换与一体化应用	83
4.5 主站应用功能	93
4.6 小结	100
参考文献	100
第 5 章 广域相量测量系统通信协议	102
5.1 主子站通信规约	103
5.2 与站内监控系统通信	111
5.3 小结	116
参考文献	117
第 6 章 电网模型参数辨识	118
6.1 基于 WAMS 的电网建模及参数辨识	118
6.2 输电线路参数辨识	120
6.3 变压器参数辨识	126
6.4 发电机参数辨识	128
6.5 负荷参数辨识	134
6.6 小结	136
参考文献	137
第 7 章 电网动态安全评估	139
7.1 电压稳定评估	139
7.2 电网功角稳定评估	144
7.3 电网动态安全综合评估	162
7.4 小结	173
参考文献	173
第 8 章 广域相量测量系统实时监视与分析	178
8.1 低频振荡监视	178

8.2	在线扰动识别	188
8.3	基于 PMU 数据的混合状态估计	192
8.4	PMU 在风电场监控中的应用	198
8.5	基于 PMU 的配电网故障定位技术	203
8.6	小结	214
	参考文献	215
第 9 章	广域后备保护与在线控制	217
9.1	广域后备保护系统	217
9.2	基于广域电力系统稳定器 (PSS) 的阻尼控制	225
9.3	广域直流协调阻尼控制系统	233
9.4	暂态稳定预测与控制	239
9.5	基于 PMU 的风电场功率控制系统	244
9.6	技术展望	249
9.7	小结	250
	参考文献	250
第 10 章	一致性测试与验证	253
10.1	主站功能测试	253
10.2	子站功能测试	263
10.3	通信协议一致性测试	285
10.4	PMU 测试仪	290
10.5	小结	294
	参考文献	294
索引		295

第1章

绪论

交流电网各母线电压间的相对相角和发电机功角是电网运行的重要状态变量，功角和相对相角的大小反映了电网的稳定裕度，功角和相对相角的周期变化反映了电网的振荡状态。因此，世界上许多国家的电力公司、科研机构 and 高校投入了大量的人力和物力，开发、研制同步相量测量装置（Phasor Measurement Unit, PMU），研究相量测量技术在暂态稳定预测、控制和自适应失步保护中的应用。在重要的变电站和发电厂安装由同步相量测量装置、相量数据集中器（Phasor Data Concentrator, PDC）等组成的广域相量测量系统子站，并将采集到的相量数据实时传输至部署在电力调度控制中心的广域相量测量系统主站，构建电力系统广域相量测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS），这将大大提升电力调度控制中心对电力系统动态安全稳定的监控能力。为叙述简洁，本书中将广域相量测量系统子站简称为 PMU 子站或子站，将广域相量测量系统主站简称为 WAMS 主站或主站。

利用 WAMS 的动态监测特点，结合电力系统能量管理系统（Energy Management System, EMS）的稳态监测优势，可以建立保障复杂大电网安全运行的调度辅助系统。依托电网实时动态监测系统可以实现大区电网动态模型参数辨识、仿真计算校核，为电力系统模型尤其是负荷模型的选择提供科学依据。电网实时动态监测系统还是建立安全稳定控制装置协调管理系统、大区电网级预防控制和恢复控制系统的基础，能进一步充分发挥电网安全自动控制装置作用，提高电网输送能力。

1.1 相量测量技术发展历程

1.1.1 国际发展

最早期的时候，相量的测量方法是将交流电压波形送到控制中心进行比较显示，由于存在不确定的延时，这种方法的测量精度太低。

1980 年，加拿大人 G.Missout 首次采用无线电导航定位系统——罗兰-C 系统提供的时间作为同步时钟，进行相量测量；由于罗兰-C 系统接收困难，1981 年又采用卫星系统 GOES（Geostationary Operational Environment Satellites）提供的时间作为同步时钟。同年，瑞士人 P.Bonanomi 采用无线电广播授时，将其时间

作为同步时钟信号进行相量测量,并首次展望了相量的应用前景。

1983年,美国人 A.G.Phadke 采用无线电广播授时的时间作为同步时钟,提出了用递推的离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)求解电压相量;由于同步时钟精度低,又采用冗余的办法来提高测量的精度。

随着美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)技术的成功研制及民用推广,同步相量测量终于解决了广域高精度时钟同步技术难题。1990年, A.G.Phadke 研制了基于 GPS 时钟的同步相量测量装置,并将其应用于 BPA(Bonneville Power Administration)的两个变电站之间的连线上。同年,法国也研制了基于 GPS 时钟的同步相量测量装置,并将测量电压相量和基于电压相量的控制作为防止法国电网崩溃的措施。从 1993 年开始, A.G.Phadke 连续发表文章推动了相量测量和应用的研究。至此,研究和应用 PMU 加强对大型电力系统的监控的热潮正在全世界各国电力公司和研究机构兴起。

1.1.2 国内发展

我国自 20 世纪 90 年代中期开始进行同步相量测量技术的研究和推广应用。

1994 年,华北电力大学开始启动对相量测量技术的研究,1995 年研制出了基于 GPS 的相量测量装置,于 1996 年 2 月通过专家评审,并获得一致好评。他们还建立了一整套关于相量测量、数据传送方面的理论和方法,并申请了国内和国际专利。

1994 年,中国电力科学研究院与台湾欧华科技公司合作开发了基于同步相量测量的电力系统稳定监录系统,它主要用于监测系统主要断面的功角稳定运行情况,观测线路上出现的低频功率振荡现象以及记录系统受扰动后各监测点的动态过程。该系统在国内推广应用较早,先后在南方电网、西北电网、华东电网、国调中心、福建电网、四川电网、河北电网投入运行,积累了丰富的实际运行经验,该系统监测并记录了华东电网、南方电网等多次低频振荡现象,为研究系统运行特性提供了宝贵的系统动态过程运行数据。2003 年,基于该系统的“华东电网功角监测技术及应用研究”项目获上海市科技进步二等奖。

1996 年清华大学用 PMU 进行了动模实验研究,理想情况下测量误差为 0.1° ,考虑了其他因素影响后,测量误差小于 1° 。在黑龙江实现了相量测量和相邻点之间的相角观测。

1997 年开始东北电网 WAMS 一期工程陆续安装了 21 台 PMU 装置,对 500kV 电网进行实时监测,该 WAMS 系统采用 2Mbit/s 的光纤网进行通信,相量数据流每秒上传 50 次,可以保存 30 天的测量数据。

1998 年开始国家电网公司国调中心陆续在阳城—江苏、福建—华东、华北—西北联络线上安装了实时功角监测装置,初步构架起了一个基于大区联网系统的功角监测系统。

自2000年以后,我国WAMS主站建设逐步进入了快速发展期。华东电网于2001年完成了WAMS系统一期工程,采集8个厂站的相量数据;2004年初投运的华北电网实时动态监测系统包括1个主站、6个子站,子站至主站实时数据传输频率达到100Hz,为国际最快水平。其他区域调度以及省级调度逐步启动了各自WAMS主站的建设。

1.1.3 装备制造及应用

国内主要电力系统装备制造厂家早在20世纪90年代中期开始就已通过技术引进、合作开发等方式启动了PMU装置的研发及样机制造,并通过装置样机的试点应用积累了丰富的工程经验。自2002年起,一大批具备自主知识产权的成熟商业级PMU装置及WAMS主站系统先后研发成功并快速应用于实时动态监测系统的建设中。

北京四方继保自动化股份有限公司于2002年初研制成功CSS-200实时动态监测系统,该系统是我国第一套具备完全自主知识产权的广域相量测量系统,在我国电力系统中被广泛使用,其中包括三峡工程及特高压变电站等国家级重点工程。该系统于2003年获中国电力科技进步二等奖。

国电南瑞科技股份有限公司于2003年研制出了SMU-1型PMU装置,并在华东电网、华北电网、华中电网等电网安装。所研发的“华东电网广域监测分析保护控制系统(Wide Area Monitoring Analysis Protection-control, WAMAP)”于2002年11月开始进行设计研究和前期准备工作,一期功能于2005年11月成功投运,二期功能于2006年12月通过现场验收。二期功能的顺利投运标志着电网调度运行决策从预案型到预警型的提升。该系统在国际上首次提出了综合应用稳态、动态和暂态数据组成的WAMAP系统的概念和总体方案,建立了广域信息的集成数据平台,初步构建了现代电力系统安全稳定协调防御体系。

2004年初,中国电力科学研究院研发出了新一代具有自主知识产权的PAC-2000电力系统相量测量装置及PSWAMS-2000实时动态监测系统主站,该系统于2004年在东北电网投入运行,并陆续在西北电网、南方电网、辽宁电网等电网推广应用。

2009年,南京南瑞继保电气有限公司首次研发出自主知识产权的PCS-996系列同步相量测量装置以及PCS-9000系列广域相量测量系统主站,分别于2009年和2012年在东北电网和南方电网投运。

1.1.4 标准制定及发展

随着广域测量技术的发展,IEEE电力系统继电保护和控制委员会设立了一个专门委员会,于1995年率先起草了IEEE 1344标准(IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems),为同步相量测量技术的各项细节如同步相量算法、通信接口的规则、推荐的标准和可能的应用提供了标准依据。2001年,IEEE颁

布了电力系统同步相量标准 IEEE Std 1344—1995 (R2001), 对同步相量的定义、同步时钟选择、时标定义和数据传输格式等基本内容做出了规定。2006 年 3 月, IEEE 正式颁布了同步相量新标准 IEEE Std C37.118—2005, 将旧标准取代, 该标准对同步相量给出了更明确的定义, 对数据格式进行了改进, 并提出了综合矢量误差 (Total Vector Error, TVE) 的概念。2011 年, IEEE 正式发布了 IEEE Std C37.118.1—2011 和 IEEE Std C37.118.2—2011 标准。IEEE Std C37.118.1 将同步相量测量装置分为 P 类和 M 类, P 类适用于保护等需要快速响应的应用, 对响应时间的要求高, 对精度的要求相对低; M 类适用于不要求快速响应的应用, 一般需要加装高阶滤波器, 但要求不受频率混叠的影响, 对测量的准确性要求高。相量数据的报文格式及传输要求则由 IEEE Std C37.118.2 进行规范。

伴随着国内 WAMS 的建设发展, 与之配套的技术标准及检测标准也经历了从无到有、多次修订的历程。为了解决国内早期同步相量测量设备通信率低、测量性能低、中心站功能弱、没有统一标准的问题, 国家电网公司国调中心于 2002 年起起草并于次年初发布了《电力系统实时动态监测系统技术规范 (试行版)》。2006 年, 经修订后的《Q/GDW 131—2006 电力系统实时动态监测系统技术规范》正式颁布实施。随后《GB/T 26862—2011 电力系统同步相量测量装置检测规范》、《GB/T 26865.2—2011 电力系统实时动态监测系统 第 2 部分: 数据传输协议》、《DL/T 280—2012 电力系统同步相量测量装置通用技术条件》等主要技术标准相继发布, 为我国的同步相量测量技术发展应用提供了技术标准支持。与此同时, 部分区域电网管理部门还结合自身运维管理工程实际情况发布了 PMU 子站、WAMS 主站运维管理技术规范。

1.2 国内外相量测量技术应用现状

1.2.1 国际应用现状

在国际上, 相量测量技术在北美、欧洲、俄罗斯、印度、南美、中美、日韩等地区和国家得到了广泛应用。

北美地区 2009 年仅有 200 台左右用于科研试验等级的 PMU, 受益于 2009 年美国恢复及重投资法令授权 (The American Recovery and Reinvestment Act of 2009), 如今近 1700 台商用的 PMU 装置安装在美国和加拿大的电力系统中, 数据上送及可视化程度近 100%, PDC 所采集的同步相量数据已经有了很广泛的共享基础。2014 年 6 月 30 日美国国家能源局发布的《美国恢复法令智能电网同步相量项目现状》说明了各电网运营区域 PMU 的应用情况。WAMS 应用主要划分为两类: 在线实时应用和离线研究应用。其中在线实时应用主要集中在广域识别及可视化、系统低频振荡、孤岛运行及一般故障情况的辨识, 故障事件的管理、预警及恢复, 功角、频率、电压稳定监测方面。而离线研究应用主要在

状态估计辅助建模和事故后的分析上。美国西部电力协调委员会 (Western Electricity Coordinating Council, WECC) 充分利用了 WAMS 系统, 项目涉及以上所有应用, 除已进入开发测试阶段的系统振荡识别项目, 其余均已正式投运或试点运行。从电网运营企业投资项目的分布来看, WAMS 在功角及电压稳定的监测、广域识别及可视化方面的应用是当下的热点。

在欧洲中部的欧洲大陆同步电网 (Union for the Coordination of Transmission of Electricity, UCTE) 高度互联, 包含了多个正在投运的 WAMS, 其同步相量测量设备主要的共同特征包括: 数据测量的高分辨率、测量电压和电流的高精度、精确同步时钟和测量文件时长可达数分钟。这些系统主要用于验证动态模型和事故分析, 其他应用功能包括: 频率监视、电压相角差监视、线路热极限监视、基于在线 $P-V$ 曲线的电压稳定监视等, 此外, PMU 装置准确度评估、基于小波分析的区间振荡弱阻尼实时监视与告警、基于广域测量的解列控制与控制系统和防御系统的接口等技术也在深入研究和开发中。

在北欧国家中, 同步相量测量技术得到了越来越多的重视。初期, 芬兰和挪威为了解决其电网互联所引发的机电扰动问题部署了数个 PMU 装置。随后由于 Olkiluto 核电站同瑞典高压直流输电 (High-Voltage Direct Current, HVDC) 互联项目的推动, 在芬兰安装了为数众多的 PMU 装置, 主要用于扰动的监测和低频振荡的辨识。未来方向是利用 PMU 量测实现 HVDC 阻尼控制, 负荷变化情况、发电机组及风电厂的动态行为的监测。挪威从 2000 年开始了一系列的 PMU 相关项目, 并积累了在 PMU 安装、通信、数据存储及分析方面的经验, 其 PMU 数据与 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 系统相整合, 并基于 LabVIEW 开发了一套可视化工具用于数字故障记录。在丹麦由电网运营商 Energinet.dk 所投运的 PMU 主要用于监测德国的交流互联线路, 其中还包括发电机组和输电线路温度的监控等。瑞典电网在网络升级过程中逐步增加 PMU 的数量, 主要是同已有 SCADA 平台相结合, 通过 PDC 主要实现扰动分析、低频振荡实时监测和提升系统状态估计等应用。

俄罗斯实现了 14 个国家的电网同步互联, 形成了地理上横跨 8 个时区的大型互联电网, 其电网管理组织 IPS/UPS 的 WAMS 主要用于系统性能监测与分析。系统参考动态模型的校核 (RDM) 也是同步相量技术的重要应用之一, UPS 系统运行方制定了一套校验方法, 包括扰动识别、扰动仿真、结果比较和参数调整等步骤, 并每年进行 4~6 次校验工作。

印度电网的装机容量在广大地域上快速增长, 随着印度电网在地域上的不断扩张, 对获悉电力系统动态信息有了更高的要求, 特别是在 2012 年印度大停电之后。为此, 印度电网公司开展了包括 WAMS、补救行动方案 (RAS)、系统完整性保护方案 (SIPS) 等的智能电网的开发和研究, 分为三个阶段: 第一阶段在

各区域关键母线上安装 PMU 装置,主要用于线下模型的修正,尤其是大型机组励磁和调速器的特征,其次就是基于 PMU 数据的全网状态估计的研究。第二阶段是通过合适位置的判断,将更多的 PMU 安装到不同母线上,通过 PDC 收集上送数据用于网络中低频振荡的辨识。第三阶段将 RAS 和 SPIS 系统用于系统安稳控制。其投运系统应用已涉及:故障探测、归类及分析,低频振荡,孤岛运行的判断及复位,基于同步相量数据的动态模型校核,电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)试验的可视化,自然灾害的监视等。

在南美、中美国家中,巴西独立电网运行方全国电力调度中心(ONS)自 2000 年后期就已经投运了两套 WAMS 相关的项目,旨在构建一个大型同步相量测量系统(SPMS),主要用于这些应用:相量测量系统的部署、基于同步相量测量数据的在线实时运行决策。前者的初衷是通过同步相量测量系统对国家互联系统(INS)的系统动态进行记录,并在未来向可能的应用延伸。后者主要核心是拓展初始的 SPMS 测量系统,用于控制中心的实时应用,如相量可视化、频率动态预警、状态估计的提升等用于支持实时调度决策。巴西已试点的基于 PMU 的在线运行应用包括:低频振荡监测预警的工具、基于功角差的线路运行压力的监测工具和协助控制孤岛运行的工具。墨西哥的广域测量系统 SIMEFAS 于 2008 年在 3 个独立的电网内组件了 6 个区域的 PDC,覆盖了超过 140 台不同厂家生产的 PMU 或带有同步相量测量功能的继电保护装置,其关注的重点为基于 WAMS 的自动发电消减方案,并考虑建设 PMU 装置用于监测风电场区域动态。

日本在东北部电网的 3 个主力电厂和 8 个超高压变电站部署了 PMU 装置,采用 64kbit/s 数字通信上送数据,子站每 40ms 计算一次相量,每隔 200ms 上送一次数据,主要用于广域动态行为监视, PSS、静止无功补偿器(SVC)等装置设计性能的验证,以及发电机阻尼测试分析。而在西部 60Hz 电网,建立了一个研究性质的基于低压配网的校园 WAMS(Campus WAMS),包括 8 台东芝公司生产的商业级 PMU 装置,分布于 8 所大学,覆盖了该电网中全部 6 个独立运营的电力公司所辖区域。以每周 96 点计算电压相量,储存间隔为 1/30s,目前主要用于动态分析研究及教育。

从 2002 年起,韩国电力公司开始构建 WAMS,包含了 24 个同步监测点,10Hz 数据更新频率,实现了基于单机等值法的在线动态安全评估(Dynamic Security Assessment, DSA),不仅考虑了功角稳定,同时还监测电压稳定性问题,并且具有系统稳定预测以及扰动记录和事后分析功能。此外,广域频率监测网技术在韩国电网的应用研究也已开展。

1.2.2 国内应用现状

在国内,随着基于同步相量测量装置的电力系统广域相量测量系统在技术上的逐渐成熟以及在省级以上电力调度中心的普遍应用,WAMS 目前已经成为我国

电力调度自动化系统必要的组成部分。自国内首套 WAMS 工程投运以来,部署在国内的多套 WAMS 主站系统先后监视并完整记录了多次电网扰动过程,为电网调度人员实时呈现了电网的动态变化过程,为分析人员提供了宝贵详实的电网动态过程历史数据。如东北电网在 2004 年 3 月 25 日、2005 年 3 月 29 日进行了人工三相短路试验时,东北 WAMS 记录了大量珍贵准确的测试数据,为仿真分析研究打下了坚实的基础;2008 年 1 月 21 日 3 时 31 分,华中 WAMS 监测记录到 14 个不同区域监测点同时发生的低频振荡,振荡覆盖湖南、湖北和河南三省,振荡频率为 $0.42\sim 0.44\text{Hz}$,振荡功率为 $108.7\sim 503\text{MW}$,振荡持续时间为 15s 左右;2008 年 4 月 21 日 10 时 28 分至 10 时 34 分在南方电网发生低频振荡,电网内各主要送出断面线路上均不同程度出现振荡,振荡事件持续约 6 分 3 秒,振荡频率 $0.36\sim 0.38\text{Hz}$,云南电网内 500kV 罗白双回线最大振荡幅值达 231.9MW ,其次大唐红河电厂的 2 号机组振荡幅值达 66.6MW 。

2010 年国家电网公司在华中电力调控分中心完成了 WAMS 在智能电网调度控制系统(简称 D5000 系统)的集成,此后,该系统快速推广到其他省级及以上调度中心,标志着中国的 WAMS 建设重点从专用独立系统向一体化应用系统的转换。

与国外相比,国内在 WAMS 应用上具有以下优势和特点:

(1) PMU 布点数量多、监测范围广。至 2017 年 10 月已有 3900 个厂站安装了 PMU,包括了 500kV 及以上变电站、220kV 重要变电站、主力发电厂和新能源并网汇集站。

(2) WAMS 主站数目多、规模大。目前已有 39 个省级及以上调度中心建设了 WAMS 主站,采集了相应厂站线路、主变压器高压侧或发电机机端量测。

(3) PMU 子站与 WAMS 主站通过双平面电力调度数据专网进行通信,实时数据传输速率支持 25 帧/s、50 帧/s、100 帧/s 等速率,WAMS 主站可以在线动态改变 PMU 子站实时数据的上送速率。

(4) 部分重要厂站的 PMU 子站已实现双 PDC 配置,具备了数据通信、数据存储等冗余功能,运行可靠性大大提升。

(5) 绝大部分厂站的 PMU 子站均采用具备北斗/GPS 双模输入的全站统一时钟装置进行对时,具备锁星情况下的高精度同步及失星情况下的高精度守时性能。

(6) 应用于发电厂的 PMU 装置均具备利用键相信号进行发电机内电势和功角直接测量的能力。

(7) 首先将 WAMS 应用于发电机一次调频、自动发电、励磁系统等控制系统的性能评估,并实现了大规模的成功应用。

(8) 首先在工程上实现了 WAMS 主站系统之间的互联共享,提出并实现了

WAMS 主站间的协同低频振荡分析和故障分析。

(9) 首先工程实施了利用 WAMS 的基于高压直流输电的低频振荡阻尼控制和基于广域 PSS 的低频振荡阻尼控制。

(10) 具有完整的 WAMS 主站、PMU 子站配套技术标准、检测标准。

经过近几十年的发展,国内 WAMS 已经开发了很多基于 PMU 数据的高级应用,典型的高级应用功能包括以下几类:

(1) 基本监视类应用:对电网动态过程进行曲线、图表等数据监视;验证动态仿真计算结果。

(2) 安全稳定分析类应用:在线低频振荡监视与分析;小幅度功率振荡统计;在线扰动识别,包括短路、开路、机组跳闸、解列、并列、直流闭锁、换相失败等扰动;电压稳定在线监视;暂态稳定在线监视;多 WAMS 联合低频振荡分析和联合故障分析;基于数据挖掘技术的电网隐患发现。

(3) 辨识类应用:并网机组涉网参数和响应特性评价;风电场并网指标和动态性能监视;线路参数在线辨识;变压器参数在线辨识;发电机参数在线辨识;负荷参数在线辨识;外网在线等值;结合 PMU 数据的状态估计。

总体来说,基于 WAMS 的电网动态过程监视、对仿真分析计算的验证、低频振荡监视、机组并网特性评估、扰动识别等应用已在电网中得到了普遍应用。但是,基于 WAMS 的暂态稳定、电压稳定、设备参数识别等功能的效果还没有达到预定期望,在 WAMS 的工程实践过程中也面临了一些新的问题,如基于 WAMS 的强迫振荡检测和控制问题、PMU 在电磁暂态分析中的局限性问题、现有 WAMS 高级应用范围的局限性问题、海量 PMU 数据对通信和存储资源的占用问题、WAMS 防卫卫星时钟欺骗问题等。

1.3 时间同步与授时技术

美国从 20 世纪 60 年代开始进行空中定位研究,1974 年基于 GPS 概念的全球定位系统开始正式研制,又叫导航卫星测时和测距(Navigation Satellite Timing and Ranging, Navstar),分为民用和军用。1985 年进入民用领域,1993 年此系统正式建成。GPS 系统由空间分布的 24 颗卫星、地面测控站和用户接收机三大部分组成,其中空间部分的 24 颗卫星包括 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星,它可以实时和全天候地为全球任一位置的接收机提供高精度的三维位置、三维速度和时间信息,其时间误差小于 $1\mu\text{s}$,对于 50Hz 的工频信号其相位误差不超过 0.018° 。

中国自行研制的全球卫星导航系统——北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS),是继美国全球定位系统(GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(GLONASS)之后第三个成熟的卫星导航系统。该系统由