

# 智能电网广域监测分析与 控制技术研究

© 陈国振 著

ZHINENG DIANWANG GUANGYU JIANCE FENXI YU KONGZHI JISHU YANJIU



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

ISBN 978-7-302-49561-9

清华大学出版社  
地址：北京清华大学学研大厦A座  
邮编：100084  
电话：(010) 62770175  
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

# 智能电网广域监测分析与控制技术研究

◎ 陈国振 著

随着智能电网的快速发展，广域监测分析与控制技术已成为智能电网的核心技术之一。本书系统介绍了广域监测分析与控制技术的理论基础、关键技术及工程应用。全书共分8章，主要内容包括：广域监测与分析的基本概念、广域监测与分析的数学模型、广域监测与分析的算法、广域监测与分析的工程应用等。本书可作为从事智能电网研究的工程技术人员、研究人员及高等院校相关专业师生的参考书。

本书共分8章，主要内容包括：第1章 广域监测与分析的基本概念；第2章 广域监测与分析的数学模型；第3章 广域监测与分析的算法；第4章 广域监测与分析的工程应用；第5章 广域监测与分析的通信网络；第6章 广域监测与分析的安全防护；第7章 广域监测与分析的标准化；第8章 广域监测与分析的展望。本书可作为从事智能电网研究的工程技术人员、研究人员及高等院校相关专业师生的参考书。

本书在内容编排上，力求做到由浅入深、循序渐进。全书共分8章，主要内容包括：第1章 广域监测与分析的基本概念；第2章 广域监测与分析的数学模型；第3章 广域监测与分析的算法；第4章 广域监测与分析的工程应用；第5章 广域监测与分析的通信网络；第6章 广域监测与分析的安全防护；第7章 广域监测与分析的标准化；第8章 广域监测与分析的展望。本书可作为从事智能电网研究的工程技术人员、研究人员及高等院校相关专业师生的参考书。

 电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press

北京 2000.08 16.00元

图书在版编目(CIP)数据

智能电网广域监测分析与控制技术研究/陈国振著.  
-- 成都: 电子科技大学出版社, 2017.11  
ISBN 978-7-5647-5301-6

I.①智… II.①陈… III.①智能控制-电网-监视  
控制-研究 IV.①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第280603号

**智能电网广域监测分析与控制技术研究**

陈国振 著

策划编辑 李述娜

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市华晨印务有限公司

成品尺寸 170mm×240mm

印 张 19.25

字 数 374千字

版 次 2018年8月第一版

印 次 2018年8月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5301-6

定 价 67.00元

版权所有，侵权必究

# 前 言

电力系统广域监测分析与控制技术关系着社会的发展以及人们的生活。此前,国内外电力系统已发生过多次振荡事件,甚至由此导致大停电事故,如1996年8月10日美国西部电网(WSCC)的振荡解列等。如今为了应对这些问题,我国自2009年正式启动智能电网技术研究和试点示范工作,在智能电网关键技术、国际国内标准制定、应用示范工程及实验检测能力建设等方面取得了一系列重大成果。

目前,相量测量装置(PMU)和广域测量系统(WAMS)已广泛应用。截至2013年年底,国内布点超过2500个,覆盖全部500kV节点、部分220kV节点和重要电厂,获取了海量的电力系统实时信息,使得改变传统动态稳定分析单纯依靠离线仿真模型的情况成为可能。我国大区电网互联实现了区域电网之间互为备用、紧急事故支援、促进电力市场开发等联网效益。但随着电网规模的扩大、电网结构的复杂化,以及各种新型输电技术的采用,使得电力系统的动态行为更加复杂,我国互联电网面临着复杂严峻的问题,智能互联电网全范围动态过程的监测、分析与控制技术研究的重要性不言而喻。

本书在内容定位上,突出技术先进性、前瞻性和实用性,全书共八章,主要内容包括:广域监测发展现状研究,电力系统分析控制原理,广域监测系统关键技术与数据处理,广域智能控制能保护技术,电力系统广域动态稳定控制,基于WAMS的电力系统检测技术以及基于WAMS电力系统的电压稳定性控制,最后列举几个电力系统实例。本书知识体系结构严谨,极具参考借鉴性,便于读者在掌握理论知识的同时更好的将其应用于实践之中,希望能为我国电力系统的广域监测与控制贡献一分力量。

由于笔者水平有限,加上时间仓促,书中难免有不足之处,希望大家批评指正。

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 广域监测发展现状研究.....         | 001 |
| 第一节 广域监测系统的提出与发展现状 /        | 001 |
| 第二节 基于 WAMS 的电力系统动态监测研究现状 / | 019 |
| 第三节 基于 WAMS 的高级应用功能研究现状 /   | 021 |
| 第二章 电力系统分析控制原理简介 .....      | 028 |
| 第一节 电力系统数学模型简述 /            | 028 |
| 第二节 电力系统稳定性分析方法简述 /         | 039 |
| 第三节 自动控制理论简述 /              | 045 |
| 第三章 广域监测系统.....             | 054 |
| 第一节 广域监测系统框架及关键技术 /         | 054 |
| 第二节 广域信息监测测试系统简介 /          | 063 |
| 第三节 广域监测系统测量数据处理与性能分析 /     | 065 |
| 第四章 广域智能控制保护技术.....         | 079 |
| 第一节 广域智能控制保护系统概述 /          | 079 |
| 第二节 广域智能控制保护系统的信息交互技术 /     | 099 |
| 第三节 基于广域信息的快速后备保护技术 /       | 124 |
| 第四节 基于广域信息的快速自愈控制技术 /       | 140 |
| 第五章 电力系统广域动态稳定控制 .....      | 155 |
| 第一节 概 述 /                   | 155 |

|             |                             |       |            |
|-------------|-----------------------------|-------|------------|
| 第二节         | 广域阻尼控制                      | /     | 167        |
| 第三节         | 关于电力系统低频振荡的研究               | /     | 178        |
| <b>第六章</b>  | <b>基于 WAMS 的电力系统监测技术</b>    | ..... | <b>193</b> |
| 第一节         | 基于 Prony 算法的低频振荡在线监测        | /     | 193        |
| 第二节         | 基于 WAMS 的电压稳定性在线监测          | /     | 205        |
| <b>第七章</b>  | <b>基于 WAMS 电力系统的电压稳定性控制</b> | ..... | <b>219</b> |
| 第一节         | 基于综合灵敏度分析的电压开环控制研究          | /     | 219        |
| 第二节         | 基于广域信息的动态电压闭环控制研究           | /     | 244        |
| <b>第八章</b>  | <b>案例分析</b>                 | ..... | <b>256</b> |
| 第一节         | 韶关电网珠全片区广域智能控制保护系统          | /     | 256        |
| 第二节         | 深圳某片区城市配网区域控制保护系统           | /     | 281        |
| 第三节         | 贵州电网电压稳定监控系统                | /     | 289        |
| <b>参考文献</b> | .....                       |       | <b>296</b> |

# 第一章 广域监测发展现状研究

电网广域监测系统简称“WAMS”系统，采用同步相角测量技术，通过逐步布局全网关键测点的同步相角测量单元（PMU），实现对全网同步相角及电网主要数据的实时高速率采集。采集数据通过电力调度数据网络实时传送到广域监测主站系统，从而提供对电网正常运行与事故扰动情况下的实时监测与分析计算，并及时获得并掌握电网运行的动态过程。

WAMS 作为电网动态测量系统，其前置单元相量测量装置 PMU 能够以数百 Hz 的速率采集电流、电压信息，通过计算获得测点的功率、相位、功角等信息，并以每秒几十帧的频率向主站发送。PMU 通过全球定位系统（GPS）对时，能够保证全网数据的同步性，时标信息与数据同时存储并发送到主站。因此，WAMS 能够使调度人员实时监视到电网的动态过程。

## 第一节 广域监测系统的提出与发展现状

为了积极应对气候变化、确保经济社会持续快速发展、促进能源结构优化和高效利用、保障电力供应安全、培育战略性新兴产业、带动相关产业发展，许多发达国家开展了智能电网的研究与实践。建设智能电网也已成为我国电力工业发展的必然选择。作为智能电网框架中三个关键研究领域之一，“广域量测与控制”担当着重要的角色。

传统上，电力系统的监控与数据采集系统侧重于其稳态运行情况的监测，对其动态行为无法有效地监测。近年来，逐步建立的、以同步相量测量装置为基础的广域测量系统（WAMS）为电力系统“广域量测与控制”的发展带来了新的信息技术平台，成为当今各国争相研究、开发、应用的新兴科技领域。它能够实现在同一时间参考轴下获取大型互联系统实时动态信息和稳态信息，为电力系统区间动态监视、分析甚至控制（包括校正、预防控制和紧急控制）提

供前提条件,使电力系统监视从稳态阶段提高到动态阶段。因此,WAMS在全网动态过程记录和事后分析、电力系统动态模型评估辨识和模型校正、低频振荡分析及抑制、暂态稳定预测及控制、电压和频率稳定监视及控制、全局反馈控制、故障定位及线路参数测量等方面都有广阔的应用前景。

## 一、WAMS的提出

大区电网互联实现了区域电网之间互为备用、紧急事故支援、促进电力市场开发等联网效益。但随着电网规模的扩大、电网结构的复杂化,以及各种新型输电技术的采用,使得电力系统的动态行为更加复杂。根据联网系统现状及规划电网的研究成果,我国互联电网发展过程中主要面临如下技术问题。

1. 互联电网送电距离较长、电压支撑薄弱,各部分间振荡模式多表现为较低频率的负阻尼或弱阻尼,易造成系统的低频振荡及系统的动态不稳定。

2. 由于跨区域长距离集中送电的交流输电通道或交直流并联输电通道越来越多,因此受端系统外受电力比重加大,负荷中心动态电压支持不足,使得受端系统电压的调控难度越来越大。此外,在有些互联电网中受端负荷中心动态无功备用不足和送电通道过于集中,同时并存,这增加了电压崩溃事故发生的概率。

3. 互联电网联络线发生的严重故障扰动影响范围扩大,系统功率振荡特征更为复杂,系统可能分成两个或以上的同调机群,使得系统电压、电流等电气量大幅度周期性波动,如果处理不好,会影响到整个互联电网的安全稳定性。

4. 目前电力系统中使用的各种类型控制器,如发电机励磁及调速系统、新型无功补偿装置、可控串联补偿器、高压直流输电控制系统等,另外随着国民经济和社会生活的发展,负荷动态特性有了新的变化,使电力系统动态特性的复杂程度增加,这对互联电网的稳定分析及控制有着重要的影响。

以上因素使得互联电网必须加强全范围动态过程的监测、分析和控制,这主要由监测层面、分析层面和控制层面构成。

### (一) 监测层面

随着互联电网规模、结构和运行方式的变化,导致了电力系统动态特性的复杂性,因而需要一定的技术手段对电网动态过程进行实时监测、记录。主要包括以下内容。

1. 加强电力系统动态过程的可观测性,能够实时、同步、广域监测电力系统的动态扰动过程。

2. 完整监测、记录全网各种动态元件（负荷、发电机、静止无功补偿装置、柔性交流输电系统等）的动态响应，进行广域电力系统的机理、特性及事故分析，加强对互联电网的认识。

### （二）分析层面

通过对互联电网的实时监测及分析，期望更深入的认识电网的物理特性及数学模型，并逐步实现电网动态稳定的实时分析。主要包括以下内容：

1. 电力系统各种物理元件数学模型的辨识和校验。
2. 电力系统控制装置的控制性能分析。
3. 电力系统动态扰动过程分析。
4. 电力系统稳定性分析。

### （三）控制层面

基于对电网动态过程实时监测、分析，逐步建立在线预决策安稳控制系统；通过构建大系统协调稳定控制，优化电网控制装置的控制性能，以提高全局优化控制及紧急控制的协调性。主要包括电网优化控制和电网紧急控制两方面。

#### 1. 电网优化控制

通过全网动态可观及应用协调控制原理，实现电网无功电压控制、阻尼控制的协调和优化。另外，通过对控制器的全过程监测，对其控制过程进行辨识和验证，可进一步提高和优化控制器的控制性能。

#### 2. 电网紧急控制

使用时域仿真技术和稳定性量化等分析方法，实现电网状态的快速监测和暂态稳定滚动预测，进而可能实现电网大范围、自适应的紧急控制。

## 二、监控系统及技术评价

目前电网调度自动化系统（EMS/SCADA 系统）以监测电网稳态运行为主，不能够满足监测动态过程的要求，例如当电力系统发生低频振荡等动态扰动时，EMS/SCADA 系统不能够提供足够高时间分辨率的扰动数据。

故障信息管理系统能够提供电网扰动时的采样点数据，然而，电网动态扰动过程的分析往往需要对长时间记录的电压、电流等同步相量数据进行比对和分析，而故障录波器数据的时间目前还不能够同步，而且录波的时间较短，一般适用于严重故障后的事故分析，不能够完全满足电网动态过程（尤其是长过程）的分析。

全系统范围动态过程监测与某个局部厂站的动态监测有很大的不同，其中

最大的难点是电力系统动态元件分布地域广阔，而基于同步相量测量技术的广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）则为电力系统实时动态监测奠定了重要技术基础。

在广域测量系统的基础上，人们能够以时空高分辨率同步监测及分析电力系统的动态过程、物理机理以及稳定性等，进而为整个电力系统的优化控制以及紧急控制提供数据平台。

### 三、上世纪末到 21 世纪初国内外 WAMS 的发展

WAMS 最早于 20 世纪 90 年代起源于美国。最近几年，在欧洲、美洲、东亚等国家陆续发展起来。下面对国外 WAMS 的发展现状进行具体介绍。我国 WAMS 的研究和应用起步于 1995 年，中国电力科学研究院与其他单位合作开发了电力系统稳定监录系统，该系统由相量测量单元（PMU）、调制解调器、中央监控站、网络服务器及资料分析站等组成。我国目前已经在东北、华北、华东、西北、南方等区域电网，以及江苏、广东及河南等省级电网构筑了实时动态监测系统。

#### （一）国外 WAMS 的发展

##### 1. 北美 WAMS 的发展

作为 WAMS 技术的发源地，20 世纪 70 年代末 80 年代初，美国弗吉尼亚理工与州立大学（Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia Tech or VT）的 A.G.Phadke 等学者采用递推方式进行对称分量离散傅里叶变换，解决了当时多种故障时保护中硬件计算能力不足的缺陷，并首次在工程中应用了相量测量的概念。1988 年，Bonneville 电力局（BPA）在美国西部电力协调联盟（Western Electric Coordinating Council region, WECC，即原 WSCC）首次使用了相量测量装置，并对这些在弗吉尼亚理工开发的原型机进行了室内和现场测试。1993 年，弗吉尼亚理工成功研制了全球第一台可商用的同步相量测量装置，这台同步相量测量装置可接收 GPS 信息，采样率为 2880Hz，可计算正序电压、电流相量、有功和无功功率。1994 年，作为一个 EPRI 研究项目的一部分，第一批该型 PMU 装置在 WECC 投入商业运行。1995 年，在美国能源部的支持下，广域电网监测系统 / 动态运行监测系统在 WECC 投入试运行。1996 年 8 月 10 日，美国西部大停电事故的相量数据很好地显示了在系统解列前，当系统变弱时相角差的增长。同时，它也清晰地展现了大停电之前和之中的系统动态行为。2 分钟之内这些数据得到了分析，为恢复供电给出了准确的

指导。而传统的 SCADA 系统未能捕捉这些动态响应或系统相角变化,故障录波装置也未能记录整个事件过程。从这个角度来说,WAMS 填补了其他测量装置未能涉及的中长期动态观测需要。

与此同时,随着广域量测技术的发展,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 IEEE1344 标准(IEEE Standard for Synchrophasors for power systems),并于 2005 年修订为 IEEE Std PC37.118-2005,为同步相量测量技术的各项细节如同步相量测量方法、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,但值得注意的是,它仅强调了稳态特性的技术参数。因此,关于 PMU 动态性能评估与校准方法的研究也在深入进行中。

2002 年,一个示范项目——东部互联相角项目(Eastern Interconnection Phasor Project, EIPP)在美国东部互联电网启动,旨在通过利用 WECC 的 WAMS 经验推广 PMU 的大规模部署,形成一个相量测量网络。2003 年 8 月 14 日的美加大停电事故强化了同步相量测量对于态势感知能力提高的价值。

2005 至 2006 年,美国西部电力协调联盟 WECC 在西部电网进行了三次重要试验。这些试验使用了其 WAMS 系统(主要由 PMU 装置构成)来获取系统对下述事件的响应:1400MW Chief Joseph 制动电阻投切、几种测试信号和环境事件。通过对广域效果和表现横跨整个西部互联系统的区间模式动态轮廓的高质量数据的实时分析来确保测试安全性。这些测试借助太平洋直流联络线(Pacific DC Intertie, PDCI)施加了一个  $\pm 20\text{MW}$  低能级的优化伪随机信号粗略地加倍了在这个电力系统中自然常见的显性噪声,在对于系统运行可以忽略的干涉下,提供了丰富的动态信息。这些试验可以替代原有的 1400MW Chief Joseph 动态制动试验,同时正在考虑将其作为评估系统动态安全的标准测试方法。2007 年,美国能源部(U.S. Department of Energy, DOE),北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Corporation, NERC),与所涉及的电力公司和组织一起构建了北美电力同步相量倡议计划(North American Synchro Phasor Initiative, NASPI)。其目的在于将原东部互联相量计划(Eastern Interconnection Phasor Project, EIPP)与其他在北美电力系统开展了多年的涉及 WAMS 的研究、开发以及部署活动整合起来,作为未来 DOE 和 NERC 的持续支持与协助的主要焦点。

至 2008 年年末,北美电网已安装大约 140 台 PMU 装置,如图 2 所示,其中东部互联和西部互联各有 70 台左右,主要安装在连接于主力发电厂的关键

节点上,以 30 点/秒的采样频率记录母线频率、电压相量和电流相量,并由这些相量衍生出有功功率和无功功率。该系统现已较为成熟地应用于动态事件记录、系统振荡模式分析研究和运行、规划用系统元件(包括同步发电机、励磁系统、原动机与调速系统、甚至负荷等)的模型校验与参数校正。同时,基于 WAMS 的状态估计,快速状态评估(涉及电压稳定、暂态稳定),系统侧谐波监视,智能安稳控制系统,以及基于地理图的 PMU 数据可视化也在持续开发中。

至 2009 年,北美 Hydro-Québec 电网已安装了 9 台 PMU 装置,除一台位于 315kV Rimouski 变电站,用于监测 Gaspé 半岛风电,其余分布于 735kV 电网关键节点上,开发的用于暂态稳定提高的静止无功补偿器 SVC 广域控制已初见成效,目前正积极探索基于 WAMS 的电网安全性快速评估技术。

此外,2010 年,以低成本、易部署的方式,弗吉尼亚理工主导建立了一个基于 120V 配电网等级的频率监测网(frequency monitoring network, FNET)。它横跨了三个北美电网:东部互联电网(Eastern Interconnection, EI),西部电力协调联盟 WECC 和德克萨斯电网的电力可靠联盟(Electric Reliability Council of Texas system, ERCOT),记录的数据及分析结果显示了在较低的电压等级上也能够得到大量有价值的大电网动态信息。该 FNET 系统借助先进态势感知技术,可以提供诸如实时事件告警,准确事件定位估计,动态事件可视化,事件后分析等功能,为 WAMS 技术研究工作提供了另一种思路 and 手段,并在日本、巴西、欧洲等国家和地区有所应用。

总的来看,虽然北美电网 WAMS 系统应用时间较长、范围也比较广,但目前仍主要用于系统运行监视及扰动或事故分析方面,全面实现电力系统安稳控制与保护系统还有待深入研究与开发。

## 2. 欧洲 WAMS 的发展

欧洲大陆同步电网(interconnected synchronous power system of continental Europe, CE interconnected system or Union for the Coordination of Transmission of Electricity, UCTE),南起伊比利亚半岛和希腊,北至丹麦和波兰,东到黑海沿岸。为 24 个国家的 4.5 亿个客户供应电能,最大负荷约 400GW,供电量 2500TWh,是世界上最大的互联电网之一。现主要国家已建成 WAMS 系统,并联网交换信息,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。

北欧电网(芬兰、挪威、丹麦等国家电网互联构成)正在积极研究和实施基于PMU准实时获取机电振荡阻尼信息的HVDC、SVC、PSS的广域反馈控制系统,从而改善其区间振荡的阻尼特性;同时与原有SCADA系统整合技术、PMU不同高级应用通信的优先级及其需求分析也在开展中。冰岛由于与其他北欧国家通过一条较弱的传输线互联,专门采用了7个PMU实时监视其阻尼情况。

俄罗斯实现了14个国家的电网同步互联,形成了世界上地理范围跨距最大(横跨8个时区)的大型互联电网,其互联电网管理组织IPS/UPS的WAMS主要用于系统性能(包括机电振荡)的监视和分析,此外还涉及相关动态模型验证(RDM),包括干扰识别、干扰仿真、结果比较、参数调整等步骤。当结果差异较大时,校正负荷和发电机组参数,该工作每年进行4~6次。

### 3. 南美、中美 WAMS 的发展

在巴西政府FINEP的资助下,UFSC大学和Reason设备供应商于2003年启动MedFasee项目,2008年低压相角测量系统LVPMS已扩张到9所大学,覆盖巴西所有电力区域。并联合巴西南部电网公司Eletrosul,于2007年在4个变电站各部署了1套高压相角测量系统HVPMS,传输速率为60帧/秒。2009年7月4日一条765kV线路故障切除后,安稳装置动作,远方切除伊泰普水电厂2300MW和图库鲁伊水电厂576MW,利用上述两个广域测量系统获得的动态记录,进行巴西互联电网系统域模型校验的案例。同时,考虑通信时延的两级广域控制构架也在积极研究中。

墨西哥的广域测量系统SIMEFAS已于2008年在三个独立电网内建成了6个区域PDC,涉及超过140台不同厂家生产的PMU或带有同步测量功能的继电保护装置,采样频率分别为20Hz(国家互联电网)和30Hz(另外两个北部电网)。已有近十年的基于PMU的事故分析及事件重现的经验,目前重点关注基于WAMS的自动发电消减方案(Automatic Generation Shedding Schemes, AGSSs)研究,并在考虑建设用于监测风场发电区域动态的PMU装置。

### 4. 亚洲、大洋洲 WAMS 的发展

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64kbps数字通信往上送数据,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、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。以每周波 96 点计算电压相量, 储存间隔为  $1/30\text{s}$ , 目前主要用于动态分析研究与教育目的。

韩国电力公司从 2002 年起开始构建其 WAMS, 系统 24 个同步监测点, 数据更新频率为  $10\text{Hz}$ 。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。

澳大利亚最大的互联电网为长条形结构, 沿澳大利亚东、南海岸绵延近 5000 公里, 环抱昆士兰, 新南威尔士, 维多利亚, 南澳, 塔斯马尼亚 ( 岛 ) 5 个州, 振荡稳定问题十分突出, 其运营商国家电力市场管理公司 NEMMCO 现已部署了两个平台, 分别为 4 个区间潮流监测装置构成的 Psymetrix 系统, 每隔 5 秒分析一次 3 分钟的  $100\text{ms}$  或  $200\text{ms}$  间隔采样的数据; 7 个相角测量装置构成的 OSM 系统, 每 5 分钟分析一次 3 小时的  $10\text{Hz}$  采样数据。虽然并非严格意义上的 WAMS, 但前者已可在阻尼越限时触发校正控制; 后者主要用于离线系统模型校核, 稳定器性能评估, 以及随机负荷扰动激励下的准实时模式阻尼趋势评价等功能。

印度正着手开发和实施一项智能网 ( Intelligence Grid ) 工程, 将 WAMS、RAS、SIPS 等整合为一体, 分为三步实施: 首先安装部分 PMU, 用于模型验证; 然后布点优化, 安装更多 PMU, 实现全网弱阻尼监测等功能; 最后实现广域协调控制功能。

## (二) 国内 WAMS 发展情况

我国相关工作起步于 1994 年, 主要有中国电力科学研究院、清华大学、华北电力大学、华中科技大学、山东大学、西安交通大学、河海大学、北京四方公司、南京南瑞公司、许继集团等科研院所、大学和设备生产商从事研究、开发和批量生产, 并分别与各电网公司陆续在一些区域电网开展试点应用。1995 年中国电力科学研究院与中国台湾欧华公司共同研制了国内第一台同步相量测量装置, 并于 1995 年在南方电网  $500\text{kV}$  天广联络线上安装了两台相角测量装置 ADX3000, 用于监视联络线相角的摆动, 广义上可说是我国第一套 WAMS 系统。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, 初步构架起一个基于大

区联网系统的功角监测系统。至 2001 年底, 大约已安装 30 台 PMU, 但限于当时的计算机水平和通信条件, 这些早期的设备存在以下缺点: 通信率低 (一般为 9.6kbps), 实时应用极少, 测量性能低, 中心站功能弱, 没有统一标准。为此, 2002 年国家电网公司国调中心开始起草并于次年初发布了《电力系统实时动态监测系统的技术规范 (试行版)》(以下简称《规范》)。随着三峡机组及其配套 8 个 PMU 的投运, 国内广域测量技术的应用得到了较大发展。因此, 可以说这一年我国才开始在电力工业中广泛应用广域测量技术。2002 年至 2005 年, 国内许多省级及区域电网针对本系统的实际情况, 陆续组建了约 10 个 WAMS 系统, 涉及约 90 台新型 PMU 装置, 传输速率 50 Hz, 夯实了技术基础, 积累了大量经验。2006 年, 经修订,《规范》正式颁布实施。2008 年底, PMU 标准草案终稿完成。

截至 2010 年, 国内主要电网的 WAMS 系统均已投入实际运行。当时我国已投入电网运行的同步相量测量装置超过 1000 套。已开发或正在研究、开发的 WAMS 可预期实现的功能主要有以下两类。

(1) 基本功能。包括集成相量数据平台 (收集与同步各 PMU 的数据, 提供标准数据接口等); 广域动态监视与分析; 同步扰动数据记录与反演。

(2) 先进功能。包括发电机运行状态监视; 在线低频振荡检测与分析; 模型及其参数辨识; 仿真校验; 混合状态估计; 在线扰动辨识; 功角稳定预测与告警; 动态电压稳定监视; 紧急控制框架中的在线预决策; 广域保护; 广域 HVDC 阻尼控制等。

在当时, 我国北京四方等公司自主研发的相量测量装置和电力系统实时动态监测主站系统在国内各、省电网公司的运行情况表明, 就应用总体水平而言, 国内基本上和国外同步; 就制造总体水平和生产能力而言, 国内与国外相比并不逊色。

但当时国内 WAMS 系统的规范标准、技术性能、先进功能、运行管理与规划建设等方面, 与国外先进水平相比, 还存在一些问题和差距。

(1) 规范标准方面。在《规范》中欠缺关于电网稳定控制方面的相关要求表述。

(2) 底层设备技术性能方面。PMU 装置、WAMS 系统的关键技术 PMU 同步采样精度和海量数据压缩还有提高的空间。

(3) 上层高级应用技术方面。大多数投运的实时动态监测系统仅用于功角摆动的观察、低频振荡的捕捉、暂态过程记录等方面, 未能充分利用相量数据

的功用，离期望还有一定距离。

(4) 规划建设方面。与运行尚未将 WAMS 系统的建设同电网规划和建设结合起来，尚未列为电网重要厂站常规装备设计的重要组成部分。

(5) 运行管理方面。在与原有 SCADA 系统整合方面尚显不足。

#### 四、全球智能电网发展状况和存在的问题

##### (一) 全球智能电网的发展情况

为了更好地利用新能源和绿色能源，减低二氧化碳等污染物的排放，提高电力供应可靠性。在 21 世纪初，美国政府提出了建设智能电网的计划。此后全球各国纷纷响应，我国在 2007 年先后有关文章和报道详细介绍和阐述了智能电网技术。所谓智能电网就是利用信息技术改造旧电网体系，逐步实现太阳能、风能、地热能的统一入网管理，并全面推进分布式能源管理，从而提高电网可靠性和能源利用效率。以下将从几个方面介绍国际智能电网发展情况。

##### 1. 电力需求响应与系统可靠性

美国政府认为：可再生资源，特别是新能源发电，需要一个“舞伴”，即一种资源能够调节日益增长的风电和太阳能的接入、并使电网运行灵活性、在可再生资源遭受剧烈的停降期间保持系统的可靠性。需求响应（DR，即客户互动）就是在此基础上提出的，DR 能够采取有效措施降低高峰需求增长，并且应用通信技术使得可再生资源比以前更加容易调度。事实上，DR 正在被美国多家电力公司当作无旋转备用并且当作“备用设备”。DR 的关键操作技术如高级智能计量和家庭用电自动化正在为这些资源带来更广泛的机遇。

大多数电力系统的原有设计是以大中心电站和未来需求中心的输配电发展为目的而设计的。目前新的智能技术开始推动原有的静态模拟设计走向更灵活、更坚强的数字控制系统，该数字控制系统更适合于像风电、太阳能与海浪能这样的可再生资源。随着智能电网的进一步发展，我们需要做更多的工作把像分布式发电、需求响应和电动汽车纳入可靠性规划和运行中。DR 有潜力与这几种新的资源共同起作用，支撑系统可靠性、帮助系统管理者管理日益增长的高峰需求、减少关键输电线路阻塞、使可再生能源发电和火力发电更加高效率使用，并且极大地提高了电力系统可靠性。先进的通信与控制技术将提高资源利用的灵活性和有效性。

##### 2. 高级计量技术

要让用户灵活选择使用可再生电力，就必须有系列配套的高级智能计量技

术和家庭用电自动化技术。为此,美国电力公司应用智能计量与AMI(高级计量设备)来满足其可再生资源的商业运作和快速发展。他们指导用户为AMI提供的新的客户互动与可再生能源高效利用做准备。

智能计量与AMI的应用是复杂的,几乎涉及配电公司的每个工作组和部门。AMI的实施直接改变了计量读数与野外操作人员的日常工作。由于新的智能技术通过网络和系统变更了与用户相互联系的标准工艺和方法,IT部门、计量部门、记账和呼叫中心等组织将面临重大转变。新的使用与控制方法将促使工作部门之间的有效整合。更多的数据将比以前设想的要容易获得。大规模高级计量技术的应用是电力公司职员必须完成的重大技术任务。例如,为了提高其最大商业和工业(C&I)用户的账单处理效率,西雅图城市照明(SCL,美国华盛顿西雅图)采用伊管企业版本(IEE)的计量数据管理系统。IEE的采用将使SCL利用单一形式的储存器管理数据实现自动数据质量日常维护,并能够使多个电力系统共享数据。另外,SCL采用高级数字信息系统来提高数据使用的灵活性、降低误差与运行成本、提高用户服务水平。

瑞典电力公司通过安装高级计量技术设计出的自动测量计数系统(AMR)来提高用户服务,允许实时或临时读数,减小记账错误与最小化仪表读数计量成本。AMR的基础是一个单通道数据交换(如运行、维护与开发成本等一批重要的数据)。但是,计量接口提供了使用新的和不同用途的可能,这样对电力公司配电业务有用并增加了其使用价值,AMR可以通过遥控来实现电力公司与用户的互动。

### 3. 高级配电网控制

高级配电网控制是智能电网的一项重要内容,电力工业有一整套的方法为配电网所面临问题提供高度先进的技术解决方案。制定了一批开放式系统协议标准,如允许配电网企业之间的数据采集、共享及变电通信。

监视控制与数据采集(SCADA)系统曾经是变电站最智能的系统。通过与新的智能标准元件及软件的组合,智能工具已帮助SCADA改进成为综合电网管理系统。系统的发展成果如:允许电力公司集中精力收集仪表计量信息来馈入他们的通话中心、调度中心与停电管理系统。信息收集与智能运行工具已被开发用于整个配电网。输配电行业各大公司仍在继续提供新的升级产品以帮助电力工业走向更加智能化的配电网。

由ABB开发的微型SCADA系统,可为电力公司的整个配电网提供即时的实时信息。微型SCADA支持广域协议与工业标准接口。开放的结构促使系统