

# 电力系统广域测量技术

鞠平 代飞 等著

WAMS for Power Systems

by JU Ping, DAI Fei et al.



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

TM711/50

2008

# 电力系统广域测量技术

鞠 平 代 飞 金宇清 鄢安河 秦 川 范 斗  
韩敬东 孙素琴 吴 峰 畅广辉 徐 群 何南强  
严登俊 刘建军 著

机械工业出版社

传统的监控与数据采集 (SCADA) 系统侧重于系统稳态运行情况的监测, 广域测量系统 (WAMS) 将使电力系统的监测从稳态水平提高到动态水平, 为电力系统动态分析和控制创造条件。

本书共分 8 章, 包括: 绪论, 广域测量系统的结构, 功角与相量测量单元, 通信系统, 控制中心站, 基于广域测量信息的低频振荡在线监测, 基于相量测量的状态估计, 试验与应用。

本书可供从事电力系统设计、运行、试验、研究等方面工作的工程技术人员以及高等院校电力专业的研究生和教师阅读。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统广域测量技术/鞠平等著. —北京: 机械工业出版社, 2008.7

ISBN 978 - 7 - 111 - 24278 - 9

I. 电… II. 鞠… III. 电力系统 - 测量 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 091829 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 于苏华 版式设计: 霍永明

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 陈 沛

责任印制: 李 妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

140mm × 203mm · 6.25 印张 · 150 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 24278 - 9

定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379728

封面无防伪标均为盗版

## 前言

电力系统的运行分析与控制，都是以状态测量为基础的。但是，传统的监控与数据采集（SCADA）系统侧重于系统稳态运行情况的监测，对系统的动态行为无法进行有效的监测。近年来，相量测量单元（PMU）和广域测量系统（WAMS）的研究开发和推广应用工作在国内外电力系统中方兴未艾，是电力系统的重大技术革新。WAMS的应用前景非常广泛，以PMU为基础的WAMS为电力系统动态监视、分析和控制创造了良好条件，将使电力系统的监控从稳态水平提高到动态水平。

本书共分8章。第1章为绪论，介绍了目前WAMS的概况。第2章为广域测量系统的结构，介绍了WAMS的组成结构、运行方式和PMU的配置。第3章为功角与相量测量单元，介绍了新型的发电机功角测量技术。第4章为通信系统，介绍了连接各厂站的PMU装置和WAMS控制中心的通信系统的组成和运作方式。第5章为控制中心站，介绍了作为WAMS核心的控制中心站的组成、功能、实现方式和高级应用功能。第6章和第7章为基于广域测量信息的低频振荡在线监测和基于相量测量的状态估计，分别介绍了基于WAMS的测量信息用于低频振荡在线检测和状态估计的研究成果。第8章为试验与应用，首先介绍了针对新型PMU测量精度的试验结果，然后介绍了WAMS在国内从试运行到正式投运以来的一些实际应用情况。

本书旨在抛砖引玉，限于水平和实践经验，书中难免有不足或有待改进之处，尚希读者不吝指正。

本书成果得到国家自然科学基金和国家重点基础研究发展计划(973计划)的资助。在研究开发过程中,得到孟远景等河南省电力公司领导的指导;研究生谢欢、王勇、袁洪、刘文彪、宋建华等参加了部分工作。在此一并表示感谢!

## 作 者

# 目 录

## 前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....         | 1  |
| 1.1 广域测量系统的意义 .....    | 1  |
| 1.2 广域测量系统的现状 .....    | 2  |
| 参考文献 .....             | 5  |
| 第 2 章 广域测量系统的结构 .....  | 9  |
| 2.1 引言 .....           | 9  |
| 2.2 系统结构 .....         | 11 |
| 2.3 PMU 的布点 .....      | 14 |
| 参考文献 .....             | 23 |
| 第 3 章 功角与相量测量单元 .....  | 25 |
| 3.1 引言 .....           | 25 |
| 3.2 相角测量方法 .....       | 26 |
| 3.3 功角测量方法 .....       | 30 |
| 3.4 功角测量技术 .....       | 37 |
| 3.5 相量测量单元 .....       | 42 |
| 3.6 分布式相量测量系统 .....    | 49 |
| 参考文献 .....             | 52 |
| 第 4 章 通信系统 .....       | 54 |
| 4.1 引言 .....           | 54 |
| 4.2 TCP/IP 网络协议 .....  | 54 |
| 4.3 实时通信网通信介质的选择 ..... | 60 |
| 4.4 广域数据通信技术 .....     | 61 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 4.5 组网技术分析比较 .....                 | 65         |
| 4.6 通信系统结构 .....                   | 68         |
| 4.7 系统通信规约 .....                   | 70         |
| 参考文献 .....                         | 83         |
| <b>第5章 控制中心站 .....</b>             | <b>84</b>  |
| 5.1 引言 .....                       | 84         |
| 5.2 数据服务器的设计与实现 .....              | 85         |
| 5.3 图形化监视子系统的实现 .....              | 94         |
| 5.4 高级应用功能 .....                   | 102        |
| 参考文献 .....                         | 109        |
| <b>第6章 基于广域测量信息的低频振荡在线监测 .....</b> | <b>112</b> |
| 6.1 引言 .....                       | 112        |
| 6.2 基于 Prony 方法的低频振荡模式识别 .....     | 113        |
| 6.3 仿真算例 .....                     | 117        |
| 6.4 基于广域测量系统的低频振荡在线分析设计 .....      | 121        |
| 参考文献 .....                         | 128        |
| <b>第7章 基于相量测量的状态估计 .....</b>       | <b>130</b> |
| 7.1 引言 .....                       | 130        |
| 7.2 一般状态估计 .....                   | 131        |
| 7.3 引入相量测量的状态估计 .....              | 131        |
| 7.4 其他相关问题 .....                   | 134        |
| 7.5 算例分析 .....                     | 137        |
| 参考文献 .....                         | 139        |
| <b>第8章 试验与应用 .....</b>             | <b>141</b> |
| 8.1 实验室试验 .....                    | 141        |
| 8.2 发电厂校核 .....                    | 175        |
| 8.3 应用举例 .....                     | 179        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 广域测量系统的意义

近年来,相量测量单元和广域测量系统的研究开发工作在国内外方兴未艾。这主要源自电力系统的两个发展需求:

1) 时间上同步。目前的各种电力系统故障录波器,由于不同安装地点之间缺乏准确的时间标记,记录的数据只是局部有效,难以用于全系统动态特性的分析。为此,2001年7月颁布实施的新版《电力系统安全稳定导则》中第5.7条要求:“电力系统应配备连续的动态安全稳定监视与事故录波装置,并能按要求将时间上同步的数据送到电网调度中心故障信息数据库,实现故障信息的自动传输和集中处理,以确定事故的起因和扰动特性,并为电力系统事故仿真分析提供依据。”

2) 空间上广域。随着电力系统的空间范围不断扩大,形成了广域电力系统。广域电力系统的运行分析与控制,都是以状态测量为基础的。传统的SCADA系统侧重于系统稳态运行情况的监测,以SCADA/EMS及有关的应用软件为代表的调度监测系统实际上是在潮流水平上的电力系统稳态行为监测系统,对系统的动态行为无法进行有效的监测。

根据电力系统的发展需求,人们开始研究相量测量单元和广域测量系统。所谓相量测量单元(PMU, Phase Measurement Unit)就是能够利用全球定位系统(GPS, Global Position System)的授时功能,给以相量形式测量到的各节点或者线路的各种状态量打

上时标的一种测量装置。与传统远方终端 (RTU) 测量不同的是: 各个 PMU 的测量值可以根据其时标统一到同一个时间坐标上, 这样不仅可以获得各种状态量的有效值, 还可以直观地了解各个状态量之间的相位关系; 利用发电机表征转子转速的相关信号, 还可以准确地测量出发电机的功角。所谓广域测量系统 (WAMS, Wide Area Measurement System) 是以 PMU 为低层测量单元, 经通信系统将测量值实时传送到数据采集器, 经过一定的数据处理后对电力系统运行进行动态监测及实现其他高级功能的系统。

以 PMU 为基础的 WAMS 为电力系统安全监视和控制创造了良好条件。电网调度人员能够可视化地了解系统的运行状态和安全程度, 必要时采取预防控制; 在故障条件下有可能通过测量到的角度信息进行动态安全的实时分析, 使调度人员能够及时了解系统的动态安全程度, 必要时采取紧急控制, 以防止系统失稳, 可以有效提高电网的安全水平, 从而产生更大的经济和社会效益; 发电机的功角信息还可以用于电网事件分析以及暂态稳定计算中模型的校核, 对电网分析十分有用。WAMS 的应用前景非常广泛。

由于电气相角与发电机功角在测量原理和应用上都有差别, 可以将单纯的相量测量单元称为 PMU, 单纯的功角测量单元称为 AMU (Angle Measurement Unit), 集功角和相量测量于一体的单元称为 APMU (Angle & Phase Measurement Unit)。但为了和以往习惯名称一致并且简单起见, 书中依然将集功角和相量测量于一体的单元称为 PMU。

## 1.2 广域测量系统的现状

### 1. 统一时标的选择<sup>[6-13]</sup>

过去由于缺乏技术手段, 电网中各测量点的时标不能精确地

统一, 测量值只是局部有效, 在很大程度上限制了许多安全稳定监控方案在实际电网中的应用。如何统一全电网的时标一直是困扰电力工作者的一大问题。GPS 的出现, 提供了一个很好的统一时标的工具。GPS 是美国于 1993 年全面建成并运行的新一代卫星导航、定位和授时系统。它由空间卫星、地面测控站和用户设备 3 大部分组成。空间卫星共计 24 颗, 平均分布在距离地球 20200km 高度的 6 个轨道面上。GPS 的工作频率大约为 1.5GHz, 以载码的形式向地面发射信号。它能覆盖全球, 全天候工作, 全天 24h 连续实时地向用户提供高精度的位置、速度和时间信息。GPS 传递的时间在地面测控站的监控下能与国际标准时间保持高度同步, 理论上 GPS 的定时精度可达到  $0.5\mu\text{s}$ 。这一特点使它成为目前世界上覆盖范围最广、精度最高的时间发布系统。此外, 它还有不需要架设通信通道、不受地理和气候条件限制、接收设备成本低廉等众多优点。

表 1-1 和表 1-2 列出了电力系统中不同应用场合对数据同时性的要求和各种提供同步时钟的方法所能达到的时间精度<sup>[16]</sup>。可以看出, 采用 GPS 构成的统一时钟可以满足电力系统中绝大部分应用场合下对同时性的要求, 是电网时间统一的理想方法。

表 1-1 电力系统中不同应用领域对数据同时性的要求

| 应用范围     | 角度精度/(°) | 位置精度/m | 时间精度/ $\mu\text{s}$ |
|----------|----------|--------|---------------------|
| 状态估计(静态) | 0.5      | —      | 25                  |
| 状态估计(动态) | 1.5      | —      | 50 ~ 250            |
| 稳定监测和控制  | 1        | —      | 50                  |
| 相角测量     | 0.1      | —      | 5                   |
| 故障定位     | —        | 304.8  | 0.5                 |
| 自适应继电保护  | 0.1      | —      | 5                   |

表 1-2 各种同步时钟信号源误差比较

| 信号源     | 误差/ms | 信号源      | 误差/ms  |
|---------|-------|----------|--------|
| WWV     | 5     | GOES     | 1      |
| WWVB    | 2     | GPS      | 0.0005 |
| OMEGA   | 10    | 模拟微波传输系统 | 1      |
| MSFDCF  | 10    | 数字微波传输系统 | 0.007  |
| Loran-C | 0.02  | 光线传输系统   | 0.5    |

近十几年来,国内外电力系统在 GPS 应用方面已经进行了不少研究工作,如利用这种高精度、高可靠性的时间信号进行继电保护、故障录波的设计等。同时,它还被用在状态估计、故障定位、线路参数的带电测量以及稳定控制方面,以解决以前难以解决或无法解决的问题。所取得的成果表明, GPS 在继电保护、故障录波和测距等方面的应用正在逐步走向实用化。

## 2. PMU 的研制<sup>[15-29]</sup>

PMU 的研究起步于 20 世纪 80 年代的美国,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。1992 年以后工业化产品问世,当时的采样频率达到 2880Hz, A/D 转换器为 16 位。标准化工作方面,在 1995 年诞生了 IEEE 1344, 2001 年修订为 C37.118。目前,美国西部 WECC 系统安装了近 50 个 PMU,主要用于动态记录 and 模型修正。北美 WSCC 系统(包括 BPA、SCE、ISO)安装了 47 台 PMU,监视约 1200 个信号,主要用于动态记录、分析和建模。美国 TVA 公司经过优化设计,在 600 条线路中的 69 条主干线上安装了 PMU,可以观测到整个系统。美国的其他许多电力公司都安装了数量不等的 PMU,少则 2 台,多则 10 多台。

在欧洲,西班牙的 CSE 公司首次将 PMU 信息用于状态估计。法国东南部系统、北欧系统、英国电网也都部分安装

了 PMU。

我国有关工作起步于 1995 年,目前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、山东工业大学、西安交通大学、河海大学等单位从事研究开发工作,设备生产厂商有北京四方继保自动化股份有限公司、上海南瑞实业有限公司、中国电力科学研究院等。我国电网中安装情况大体如下:国家电网调度中心在阳城、全国联网工程、三峡工程中部分安装了 PMU,拟进一步全面安装构成系统;省级电网调度中心安装 PMU 的有河南、广东、黑龙江、辽宁、河北、江苏、福建、四川等。

总之,目前基于 GPS 的 PMU 的研制和应用不少,但欧美国国家的大多数装置只测量电气量的相角,不测量发电机的功角。我国研制的一些装置能够直接测量发电机功角,但仍然存在一定不足,比如有的只能应用于汽轮机,有的暂态精度不够,有的需要停机安装等。更重要的是,这些装置应用范围小、应用功能窄,还未见在某一电网中全面安装功角和相角测量装置并组成 WAMS 的报道。

### 3. 本书内容

根据目前电力系统中积极建设和使用 WAMS 的现状,本书以河南省电网公司与河海大学共同实施的河南电网 WAMS 项目为基础,对功角与相量测量装置、广域测量系统及其应用功能等方面进行详细的介绍。

## 参考文献

- [1] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6 (2): 10-15.
- [2] Phadke A G, Pickett B, Adamiak M, et al. Synchronized sampling and phasor measurements for relay and control [J]. IEEE Trans on Power De-

- livery, 1994, 9 (1): 442-452.
- [3] Phadke A G. Synchronized phasor measurements a historical overview [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002, 1: 476-479.
- [4] Ballance J W, Bhargava B, Rodriguez G D. Monitoring power system dynamics using phasor measurement technology for power system dynamic security assessment [C]. 2003 Bologna IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, 2003, 3: 683-689.
- [5] Burnett R O, Butts M M, Cease T W, et al. Synchronized phasor measurements of a power system event [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (3): 1643-1650.
- [6] 高厚磊, 历吉文, 文锋. GPS 及其在电力系统中的应用 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19 (9): 41-44.
- [7] 韩英铎, 王仲鸿等. 电力系统中的三项前沿课题 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1997, 37 (7): 1-6.
- [8] 苗世洪, 王少荣, 刘沛, 等. 基于 GPS 的电网状态监测系统的设计与实现 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (12): 52-54.
- [9] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统实时相角监控系统结构研究. 电网技术, 1998, 22 (5): 18-20.
- [10] 张承学, 龚庆武, 等. 基于 GPS 同步采样装置的研制及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (10): 49-51.
- [11] 郭强, 刘晓鹏, 吕世荣, 等. GPS 同步时钟用于电力系统暂态稳定性预测和控制 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (6): 11-13.
- [12] 曾祥君, 尹项根, 陈德树, 等. 基于整个输电网 GPS 行波故障定位系统的研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (5): 8-10.
- [13] 陈允平, 张承学, 胡志坚. 以 GPS 为基础的线路参数带电测量 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (6): 43-45.
- [14] 鞠平. 电力系统非线性辨识 [M]. 河海大学出版社, 南京, 1999.
- [15] 严登俊, 鞠平, 吴峰, 韩敬东. 基于 GPS 时钟信号的发电机功角实

- 时测量方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (8): 38-40.
- [16] 闵勇, 丁仁杰, 任勇, 等. 电力系统全网同步监测系统 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1997, 37 (7): 86-88.
- [17] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统实时相角监控系统研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (9): 17-19.
- [18] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统相角测量和应用 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (4): 41-43.
- [19] Saitoh H. GPS synchronized measurement applications in Japan [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002, 1: 494-499.
- [20] Akke M, Karlsson D. Phasor measurement applications in Scandinavia [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002, 1: 480-484.
- [21] Liu Chih Wen. Phasor measurement application in Taiwan [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002, 1: 490-493.
- [22] Bhargava B. Synchronized phasor measurement system project at Southern California Edison Co [C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton, Alta, Canada, 1999, 1: 16-22.
- [23] Rasmussen J, Jorgensen P. Synchronized phasor measurements of a power system event in Eastern Denmark [C]. 2003 Bologna IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, 2003, 3: 678-682.
- [24] Cai J Y, Huang Z, Hauer J F, Martin K. Current status and experience of WAMS implementation in north america [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES.
- [25] Leirbukt A B, Gjerde J O, Korba P, et al. Wide area monitoring experiences in norway [C]. Power Systems Conference and Exposition, PSCE 06, 2006, 1: 353-360.
- [26] Yi K K, Choo J B, Yoon S H, et al. Development of wide area measure-

- ment and dynamic security assessment systems in Korea [C]. Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, 3: 1495-1499.
- [27] Babnik T, Gabrijel U, Mahkovec B, et al. Wide area measurement system in action. Power Tech, 2007, 1: 1646-1651.
- [28] Martin K E. Phasor measurement systems in the WECC [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2006 IEEE.
- [29] 严登俊, 袁洪, 高维忠, 等. 利用以太网和 ATM 技术实现电网运行状态实时监测 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (10): 67-70.
- [30] 谢欢, 吴峰, 鞠平. 实时数据服务器软件设计 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (11): 56-59.
- [31] 严登俊, 鞠平, 袁洪. 网络通信模式下电网相量的广域测量与实时传输系统 [J]. 电网技术, 2004, 28 (4): 15-18.
- [32] 王勇, 鞠平. 部分节点引入相量测量的状态估计 [J]. 河海大学学报, 2004, 32 (2): 87-90.
- [33] 孙建华. 一种电力系统暂态稳定性快速实时预测方法 [J]. 电机工程学报, 1993, 13 (6): 62-66.

## 第2章 广域测量系统的结构

### 2.1 引言

对于电网这样一个覆盖地域广、结构复杂的大系统来说，构建 WAMS 是一个庞大的系统工程。许多电力科技工作者对这个问题进行了研究，设计出一些 WAMS 的结构方案。

本章参考文献 [1] 提出的 WAMS 结构如图 2-1 所示。图中，状态监测主站位于省调中心，子站为各功角监测点。子站由功角和相量测量装置、时间同步装置、通信系统和工控机组成。为了保证实时性，主站与子站之间的通信通道采用专用的微波通道。该系统已经通过了动态模拟试验，各项技术指标已达到运行要求，并且部分功能模块已现场运行。

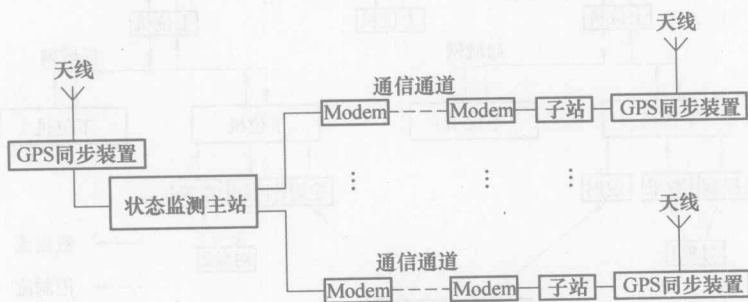


图 2-1 WAMS 结构之一

本章参考文献 [2] 提出的相角监控系统结构与图 2-1 类似，只是在各功角测量子站中选择一个主力发电厂或枢纽变电站

