

# 电网实时动态监测技术 及应用

陈实 许勇 王正风 王俊永 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 电网实时动态监测技术 及应用

陈实 许勇 王正风 王俊永 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书主要介绍电网实时动态监测技术在电力系统的应用及发展情况。全书共分为九章,分别为电网实时动态监测技术的发展与现状,同步相量测量装置,电网实时动态监测系统的通信规约,电网实时动态监测系统主站,电网实时动态监测技术在电力系统动态监测中的应用,电网实时动态监测技术在电力系统在线分析中的应用,电网实时动态监测技术在电力系统稳定控制中的应用,基于PMU的电力系统建模及参数辨识以及智能电网。

本书的读者对象主要为电网公司以及发电厂电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员,也可作为电气工程专业和电力系统专业的研究生、本科生以及电力专业教师的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电网实时动态监测技术及应用 / 陈实等编著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2010.1  
ISBN 978-7-5084-7203-4

I. ①电… II. ①陈… III. ①电力系统—动态系统: 监测系统—技术 IV. ①TM769

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第022980号

|         |                                                                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名     | 电网实时动态监测技术及应用                                                                                                                  |
| 作 者     | 陈实 许勇 王正凤 王俊永 编著                                                                                                               |
| 出 版 发 行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售     | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                            |
| 排 版     | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                |
| 印 刷     | 北京市地矿印刷厂                                                                                                                       |
| 规 格     | 145mm×210mm 32开本 8印张 230千字                                                                                                     |
| 版 次     | 2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷                                                                                                        |
| 印 数     | 0001—3000册                                                                                                                     |
| 定 价     | 38.00元                                                                                                                         |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前言



自 20 世纪 90 年代初期，基于全球定位系统（Global Position System，简称 GPS）的相量测量单元（Phasor Measurement Unit，简称 PMU）的成功研制，标志着同步相量技术的诞生，从而为建立电力实时动态监测系统提供了有力的技术手段。应用电网实时动态监测技术可以实现在同一时间参考轴下获取大规模的电力系统实时动态信息和稳态信息，从而为电力系统的运行和控制提供了新的途径和方法。

本书在结合电力生产的基础上，系统地介绍了电网实时动态监测技术的发展与现状；同步相量测量装置；电网实时动态监测系统的通信规约；电网实时动态监测系统主站；电网实时动态监测技术在电力系统动态监测中的应用；电网实时动态监测技术在电力系统在线分析中的应用；电网实时动态监测技术在电力系统预防控制及紧急控制中的应用；电网实时动态监测技术在电力系统参数辨识中的应用，最后还对国内外智能电网的发展情况进行了介绍。

本书是针对电网实时动态监测系统建设及应用的工程实际情况进行撰写，注重实用化是本书的特色。本书在撰写过程中，吸收了国内外近些年有关电网实时动态监测系统在电力系统应用的最新成果，同时也包含了安徽电力调度通信中心与中国电力科学研究院在电网实时动态监测系

统设计与应用中的工程经验和技術总结。

本书内容丰富，可供电网公司以及发电厂电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员参考，也可作为电气工程专业和电力系统专业研究生和本科生的参考资料，亦可作为电力工程专业教师的参考书。

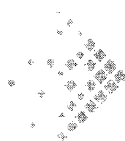
本书由安徽省电力调度通信中心王正风博士，国家电网公司管理专家陈实高级工程师，中国电力科学研究院许勇高级工程师和王俊永高级工程师共同编写。

由于编者水平有限，因此本书不完善、不正确的地方在所难免，恳请读者给予批评指正。

作者

2009年12月

# 目录



## 前言

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>第一章 绪论</b> .....                      | 1  |
| 第一节 电网实时动态监测技术 .....                     | 1  |
| 第二节 电网实时动态监测系统的组成 .....                  | 5  |
| <b>第二章 同步相量测量装置</b> .....                | 9  |
| 第一节 相量测量的原理 .....                        | 9  |
| 第二节 同步相量测量装置硬件 .....                     | 12 |
| 第三节 同步相量测量装置软件 .....                     | 22 |
| 第四节 相量测量的算法 .....                        | 32 |
| 第五节 守时技术 .....                           | 44 |
| 第六节 同步相量测量装置的布点原则 .....                  | 45 |
| <b>第三章 电网实时动态监测系统的通信规约</b> .....         | 52 |
| 第一节 数据类型及报文格式 .....                      | 53 |
| 第二节 实时数据通信流程 .....                       | 61 |
| 第三节 离线数据通信流程 .....                       | 62 |
| <b>第四章 电网实时动态监测系统主站</b> .....            | 64 |
| 第一节 主站系统硬件 .....                         | 64 |
| 第二节 主站系统软件 .....                         | 65 |
| 第三节 系统支撑平台 .....                         | 66 |
| 第四节 动态数据库的使用 .....                       | 73 |
| <b>第五章 电网实时动态监测技术在电力系统动态监测中的应用</b> ..... | 85 |
| 第一节 电网动态监测 .....                         | 85 |

|            |                                      |            |
|------------|--------------------------------------|------------|
| 第二节        | 越限监视 .....                           | 88         |
| 第三节        | 相角参考点处理 .....                        | 89         |
| <b>第六章</b> | <b>电网实时动态监测技术在电力系统在线分析中的应用 .....</b> | <b>91</b>  |
| 第一节        | 电网扰动识别 .....                         | 91         |
| 第二节        | 基于 PMU 的状态估计 .....                   | 95         |
| 第三节        | 电力市场辅助服务 .....                       | 98         |
| <b>第七章</b> | <b>电网实时动态监测技术在电力系统稳定控制中的应用 .....</b> | <b>103</b> |
| 第一节        | 前言 .....                             | 103        |
| 第二节        | 电网实时动态监测技术应用于电力系统静态稳定分析及控制 .....     | 104        |
| 第三节        | 电网实时动态监测技术用于电力系统暂态功角稳定及控制 .....      | 111        |
| 第四节        | 电网实时动态监测技术用于电力系统暂态电压安全及控制 .....      | 130        |
| 第五节        | 暂态稳定控制的协调统一 .....                    | 135        |
| 第六节        | 电网实时动态监测技术在电力系统低频振荡分析中的应用 .....      | 140        |
| 第七节        | 小结 .....                             | 171        |
| <b>第八章</b> | <b>基于 PMU 的电力系统建模及参数辨识 .....</b>     | <b>172</b> |
| 第一节        | 前言 .....                             | 172        |
| 第二节        | 发电机参数辨识 .....                        | 176        |
| 第三节        | 发电机励磁系统及调速器参数辨识 .....                | 186        |
| 第四节        | 负荷建模及参数辨识 .....                      | 199        |
| 第五节        | 输电线路参数测量及辨识 .....                    | 206        |
| <b>第九章</b> | <b>智能电网 .....</b>                    | <b>210</b> |
| 第一节        | 智能电网简介 .....                         | 210        |
| 第二节        | 电网实时动态监测技术在智能电网中的应用 .....            | 222        |

附录一 PMU 子站通信带宽计算 ..... 232

附录二 发电机 7 阶模型与 5 阶模型..... 234

附录三 异步电动机 5 阶模型与 3 阶模型..... 238

参考文献 ..... 242

# 第一章 绪 论

## 第一节 电网实时动态监测技术

从 20 世纪 60 年代以来,多起大面积停电事故不断发生,对社会生产和生活造成极大影响。这些大面积停电事故使人们进一步认识到应该从整体或区域电网的角度加强继电保护和自动控制,不仅要加强继电保护本身的可靠性,还要使继电保护和自动控制装置的动作相配合,加强对故障后不稳定系统的控制。与此同时,非线性超大规模电力系统具有动态不确定性,使得其分析和安全预警难度很大,长期沿用的基于局部信息的电力系统控制和保护设计方法以及静态安全防御系统的构架,不能满足超大规模电力系统振荡抑制与控制、系统保护和动态安全防御的要求,这迫切要求新的技术方法和新的技术手段。广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 作为新一代的稳控技术应运而生,它为大电网向着大面积实时监测和控制方向的发展提供了先进和可能的信息技术平台,因此又称电网实时动态监测系统,成为当今各国争相研究开发的新兴科技领域之一。

电网实时动态监测系统利用同步相量测量装置 PMU (Phasor Measurement Unit) 的三大特色:①直接测量发电机功角;②最快每隔 10ms 向调度主站传送一次电网动态数据;③利用 GPS 给每个数据打上时标,获取同一时间断面上的数据,从而实现电网的动态数据监测、记录、电网扰动分析和电网低频振荡告警等,提高电网安全稳定性。由于该系统可以实现 40ms 及以内的高速同步测量和数据记录,为准确分析电网的扰动原因发挥了重要作用。

### 一、国外研究与应用

广域测量技术研究始于 20 世纪 70 年代后期,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,首次在工程中应用了相量测量的概念,1993年美国弗吉尼亚大学研制了全球第一台同步相量测量装置,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。

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,研究同步相量测量、通信接口的规则、推荐的标准和可能的应用等。先后起草了IEEE 1344-1995标准(IEEE Standard for Synchrophasors for power systems)和IEEE Std PC37.118-2005,为同步相量测量的各项技术细节提供了技术标准。

目前国内外已经有大量同步相量测量装置投入到电力系统中,应用于状态实时监控、电力系统控制和保护装置投运试验、继电保护、电力系统扰动记录等多个领域,为电网动态运行提供了可靠与精确的连续性监测和记录,以下为国外广域测量技术的应用情况。

### 1. 美国

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美国西部电力联盟(WSCC)投入试运行,此工程项目主要是确定在大电网的输变电系统里新的数据测量与信息需要,以便制定为了满足复杂的大电网运行所需要的电网运行状态监测、预警、动态控制的指南。广域电网测量系统/动态运行监测系统(WAMS)技术已经证实是维护电力基础设施在大电网长距离高效率输电条件下的可靠与安全运行的工具。这一技术的采用,提高了美国西部输电能力,在美国西部大停电事故中记录了极其珍贵的数据。

由于广域电网测量系统/动态运行监测系统(WAMS)技术的采用,1996年8月10日美国西部大停电事故的数据在2min之内就得到了分析,对恢复供电给出了准确的指导。

美国佛罗里达和佐治亚电力系统装设了由三个PMU组成的监测系统。在一次系统扰动中,监测系统在佛罗里达电网和佛罗里达-佐治亚联络线上同时监测到系统有功率摇摆,完整地记录下了动态过程中系统的电压、功率、频率的变化情况,而传统的故障录



波器无法检测到这种扰动。

美国能源部 (DOE) 在总结大型互连电力系统事故的基础上, 在 20 世纪 90 年代中发起“广域电网测量系统”项目研究, 由美国邦纳维尔电力局 (BPA) 和西部电力局 (WAPA) 牵头进行。1996 年夏季美国西部大停电事故后, 加强了对该项目的支持力度。

自 2000 年, 在电力可靠性技术咨询集团 (CERTS) 的组织之下, 美国西部电力联盟 (WSCC) 与美国能源部国家实验室、美国电力科学研究院 (EPRI) 和几所大学合作, 开始了用于检验西部电网稳定特性的运行试验及电网动态运行稳定性的控制等领域的工作与研究。

在开发负荷监测系统、负荷模拟方法及负荷模型方面, 美国也做了不少工作。美国电科院 (EPRI) 与新墨西哥州大学 (New Mexico State University) 合作, 选择典型的居民负荷、商业负荷、工业负荷和农业负荷馈线安装数据采集装置, 安装在带负荷调压变压器 (LTC) 的二次侧。捕捉负荷对电压扰动的响应, 用所测得的数据, 识别每一类负荷的响应, 转换并简化, 利用分类数据进行外推。

美国能源部联合邦纳维尔电力局 (BPA)、南加州爱迪生公司的 WAMS 目前还主要用于事件记录和系统振荡模式研究, 系统模型的改进主要是通过 WAMS 系统记录故障信息, 通过离线分析、计算, 比较实测曲线, 滚动修改模型。

虽然美国 WAMS 系统应用时间较长、范围也比较广, 但目前主要用在系统正常监视及事故分析上, 用于电力系统稳定控制还任重道远。

## 2. 法国

法国 EDF 电力公司的协调防御计划是由 24 个同步相量测量装置和位于控制中心的两台计算机组成。该计划于 20 世纪 90 年代初开始分步实施。控制中心的一台计算机用于决策处理, 另一台用于分析系统状态行为, 系统已经正式投入运行。

## 3. 西班牙

西班牙电力公司将 WAMS 系统采集的数据与 SCADA 系统进



行混合状态估计,系统已经正式投入运行。

#### 4. 意大利

意大利国家电力公司将 WAMS 数据用于电网扰动分析,系统记录并用于分析 2003 年发生的大停电事故,目前正在开展的研究有基于 WAMS 系统的决策系统及广域保护。

#### 5. 巴西

2004 年巴西开始建设 WAMS 系统,这套系统包含三台同步相量测量装置和一台数据集中器,系统的目标是实现电网监视和控制。

#### 6. 韩国

韩国在 2002 年 9 月投运了暂态稳定控制系统,该系统是由 8 台同步相量测量装置组成集中式系统,数据更新速率为 10Hz,每 15min 完成一次预想事故的稳定计算,稳定计算算法为单机等值法 SMIE。

#### 7. 日本

日本东京电力公司基于相角预测的失步保护投入试运行多年。日本东北电力公司在电网中多个节点安装了具有同步相量测量功能的实时监测与记录系统,用于电力系统控制和保护装置投运试验,实现的功能包括:

- (1) 在 PSS 试验中,记录电力系统波动情况。
- (2) 在自动电压无功控制器试验中,记录电压波动数据。
- (3) 在利用 SVC 进行系统稳定试验中,记录系统波动情况。
- (4) 记录系统意外事件中电力系统波动情况。
- (5) 在实时监测中,用于研究远方母线间电压相角差。
- (6) 记录东北电网与东京电网互连线间的功率振荡情况。

## 二、国内研究与应用

20 世纪 90 年代初中国电力科学研究院与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 500kV 天广联络线上构建了我国第一套 WAMS 系统。1998 开始,国家电网公司电力调度通信中心(以下简称国调中心)陆续在阳城—江苏输电线、福建—华东联络线、华北—西北联网的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，为以后的发展做了技术铺垫和经验积累。国内在 1996~2002 年建设的电网实时动态监测系统/WAMS 基本上实现了系统局部的相量测量和动态数据记录功能，多次捕捉到系统内的低频振荡事件，为电力系统的安全稳定运行提供了有力的技术支持手段，但是因当时的计算机水平及通信条件限制，主站与子站间只能通过 Modem 拨号进行互连，无法快速传送大量的实时数据，同步相量测量装置大多仅被作为故障录波器使用，系统的应用只限于事后分析。

从 2002 年开始，中国电力科学研究院、清华大学、华北电力大学、河海大学、四方公司、南瑞公司等单位相继开始了该技术领域的研发，并分别在一些区域电网进行了试点运行。随着三峡机组的投入运行，国内广域测量技术的应用逐步得到了较大发展。国内许多省级及区域电网针对本系统的实际情况，陆续组建了一些利用广域测量技术的电力系统实时动态监测系统。国调中心针对电网实时动态监测系统/WAMS 的建设应用情况，于 2005 年起草了《电力系统实时动态监测系统的技术规范》，并于 2006 年正式颁布。至 2008 年底，国内主要电网的 WAMS 系统均已投入实际运行，据不完全统计我国目前已投入电网运行的同步相量测量装置超过 1000 套。

运行实践证明，同步相量测量系统不仅为电网的安全运行提供了准确的实时功角数据，还能准时、精确地记录电网中发生的所有异常工况，成为电网安全稳定运行不可缺少的工具。如东北电网利用电网实时动态监测系统/WAMS 系统，在 2004 年和 2005 年两次大扰动试验中，同步相量测量装置及电网实时动态监测系统/WAMS 系统完整记录了扰动过程的数据。根据同步相量测量装置记录的动态数据及暂态数据，完成了系统模型参数的验证，对东北电网的负荷模型和系统分析提供了有力的支持。

## 第二节 电网实时动态监测系统的组成

电网实时动态监测系统由调度中心主站、子站（PMU）及高

速通信网络等组成，其系统拓扑结构图如图 1-1 所示，系统逻辑关系图如图 1-2 所示。

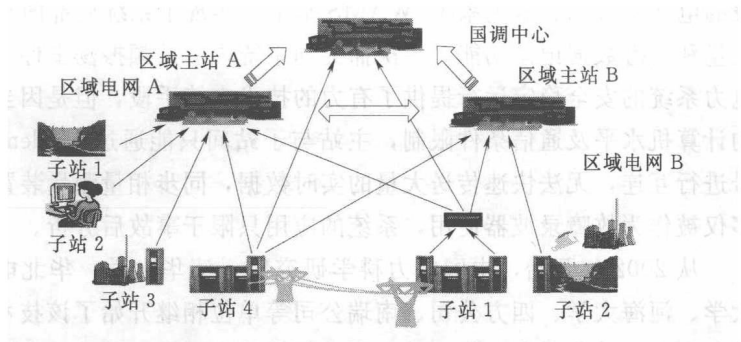


图 1-1 WAMS 系统拓扑结构图

### 1. 子站（PMU）

子站即发电厂和变电站安装的同步相量测量装置，是安装在同一发电厂或变电站的相量测量装置和数据集中器的集合，可以是单台相量测量装置，也可以由多台相量测量装置和数据集中器构成。其主要功能如下：

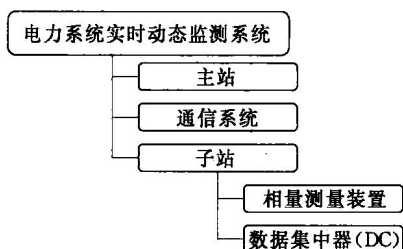


图 1-2 WAMS 系统逻辑关系图

（1）相量测量单元将电网各节点的相量测量值送到控制中心，把绝对时标下的相量测量值折算到某个时间参考点的坐标下，从而得到整个电网的同步相量。

（2）同步相量测量装置具有连续记录功能，可以连续记录不少于 14 天的动态数据，而且可以触发记录暂态数据。

（3）一个子站可以同时向多个主站传送测量数据。子站能测量、发送和存储实时测量数据。子站能与变电站自动化系统或发电厂监控系统交换信息。

（4）发电厂子站相量测量装置能监测发电机组功角、母线电压、元件电流相量和频率等电气量。



(5) 变电站子站相量测量装置监测母线电压、元件电流相量、频率等电气量，通过数据网发送至主站。

与传统的监测设备相比，对 PMU 装置的性能要求主要体现在可靠性、准确性和实时性三个方面。

(1) 可靠性是对实时监控设备的基本要求，它包括设备的可靠性、数据传输与处理的可靠性。设备的可靠性是指设备在规定的时间内和使用条件下完成所要求功能的能力，它可用“平均故障间隔时间”和“可用率”来表示。数据传输的可靠性是指数据通信系统保持正常连续运行的能力。此外，PMU 是一种对数据进行定时循环采样的装置，处理的对象是带有时标的相量，PMU 应保证采样点连续，并且不丢失。因此，PMU 的可靠性还应包括数据的完整性，它可以用单位时间内“数据的丢失率”表示。

(2) 准确性是 PMU 实现电网实时动态监测最重要的要求。对一般的测量系统来说，设备的精确性精度主要是指设备的测量精度，主要与模/数转换等各测量环节有关，采用高精度的 A/D 转换装置可有效提高测量的精度。对于 PMU 来说，PMU 装置的精度还与同步采样时钟和相量计算的精度有关。采样环节采用了以 GPS 信息为基础的同步时钟信号，同步时钟的误差将控制在  $\pm 1\mu\text{s}$  以内，在工频为 50Hz 的条件下由同步时钟引起的相角测量误差小于  $\pm 0.018^\circ$ 。

(3) 实时性是电网监控系统的重要特性。实时动态监测系统的实时性主要取决于数据传输中各个环节的延时特性，与网络结构、传输速率密切相关，同时也依赖于终端设备本身由于数据处理产生的延时。PMU 装置的实时性装置的输出时延（即数据的发送时刻相对其时标的时间差）按规范的规定不大于 30ms。

PMU 和故障录波器的作用是不同的，区别在于：

(1) PMU 经过傅里叶计算后得到相量并将其上传 WAMS 主站，PMU 上传的相量反映了电网的当前运行情况，诸如线路是否重载、发电机的工况等；在电网发生扰动时，不仅同时保存相量，而且保存采集的暂态录波数据。而故障录波器仅在当地保存了电网发生短路时的暂态录波数据，无法反映系统的运行特征。



(2) PMU 无论在系统正常情况下还是在电网发生扰动时均记录电网实时数据,而故障录波器只有在电网故障时才记录数据。若系统发生低频振荡,故障录波器可能不启动,因而无法记录电网的实时动态数据。而 PMU 这种针对小扰动所记录下的实时动态数据,为电网的振荡模式识别及调度运行人员的小扰动分析都提供了有益的帮助。

(3) PMU 拥有高精度的 GPS 对时,保证了数据的获取在同一时间断面上,为事故后的分析提供了有效的数据。而目前故障录波器记录的数据缺乏同一时标,故无法从系统的角度去分析问题和解决问题。

(4) PMU 能够采用机械法直接测量发电机的功角,为发电机运行状态和低频振荡的监测提供了支持,从而为系统的稳定运行及控制提供了有益的指导,保证了电力系统的稳定运行。

## 2. 主站 (main station)

主站即调度中心主站,一般由主站基础平台及之上的高级应用功能等组成,用于接收、管理、存储和转发源自子站数据的实时动态测量数据,实现对电力系统的运行状态进行监测、告警;实现对实时相量数据进行分析处理和存储归档;实现在线稳定计算分析及控制等功能。

## 3. 高速通信网络

高速通信网络目前国内普遍采用电力调度数据通信网络。在不具备网络通信条件时,一般采用专用通信通道(如 64K/2MG.703 通道等),通信速率不低于 19.2kbit/s。主站之间的通道带宽应不低于 2Mbit/s。

## 第二章 同步相量测量装置

### 第一节 相量测量的原理

交流电网各母线电压间的相对相角及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频率。因此，实时监测功角和相对相角是了解电网动态特性和维持电网稳定运行的重要手段。

#### 一、同步相量的概念

交流电力系统的电压、电流的理想信号可以使用相量表示，设正弦信号为

$$x(t) = \sqrt{2}X\cos(2\pi ft + \varphi) \quad (2-1)$$

可以采用相量表示为

$$\dot{X} = Xe^{j\varphi} = X\cos\varphi + jX\sin\varphi = X_r + jX_i \quad (2-2)$$

由式(2-2)可见，相量有两种表示方法：直角坐标法（实部和虚部）和极坐标法（幅度值和相位）。图2-1为直角坐标法相量图。

由此可见相量测量必须同时测量幅值和相角。幅值可以用交流电压电流表测量；而相角的大

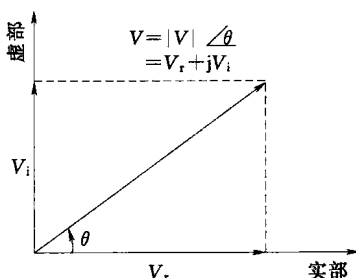


图2-1 交流信号相量图

小取决于时间参考点，同一个信号在不同的时间参考点下，其相角值是不同的。电力系统各点测量的相量数据如果没有统一的时间基准是无法进行比较的，在此种情况下的比较也是没有意义的。所以，在进行系统相量测量时，必须有一个统一的时间参考点，如高