



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能变电站

技术与实践

覃剑 主编



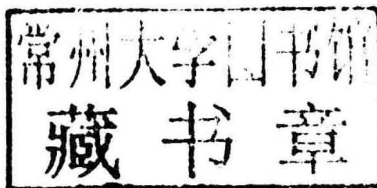
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能变电站 技术与实践

覃 剑 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从智能变电站概念、特征、构成、体系入手,深入浅出地介绍了有关智能变电站的基本理论,并根据工程研发及实施,详细阐述了智能变电站开发过程中的技术难点及解决方案。全书共 11 章,主要内容有智能变电站概述、智能变电站的体系结构、IEC 61850 标准及其关键技术、智能变电站网络通信技术、电子式互感器、智能电器、变压器智能监测、过程层关键技术、间隔层关键技术、站控层关键技术和智能变电站的应用实例。

本书可供广大电力系统工程技术人员和科研人员、高校师生学习和研究智能变电站时阅读参考,还可以作为变电站自动化领域的相关从业者的技术培训和研发的辅助教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能变电站技术与实践/覃剑主编. —北京:中国电力出版社, 2010. 12

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1115 - 2

I. ①智… II. ①覃… III. ①数字技术—应用—变电站
IV. ①TM63-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 228015 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 1 月第一版 2012 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 493 千字
印数 0001—3000 册 定价 68.00 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

《智能变电站技术与实践》

编 委 会

主 编 覃 剑

副 主 编 李永亮 王庆平

参编人员 常 广 郭宁明 鄢素云 苏 瑞

张 鹏 李 刚 王冬青 刘 巍

李 冰

序

2009 年底的哥本哈根气候大会引起全球瞩目，我们居住的地球正面临着气候变暖带来的巨大威胁，低碳经济是人类得以延续和生存的必由之路。而低碳经济的两个主要手段——节能增效和使用可再生清洁能源都可以在目前正热论和研究的“智能电网”中得到体现。智能电网，就是电网的智能化，它是建立在集成的、高速双向通信网络的基础上，通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法以及先进的决策支持系统技术的应用，实现电网的可靠、经济、高效、环境友好和使用安全的目标，其主要特征包括自愈、互动、安全抵御攻击、提供满足 21 世纪用户需求的电能质量、容许各种不同形式能源、发电的接入、启动电力市场以及资产的优化高效运行。

智能电网涉及电力生产的各个环节，包括发电、输电、变电、配电、用电，甚至调度也离不开信息和通信技术的支持。其中，变电站是智能电网的重要信息来源和命令执行者，变电站的自动化、智能化水平是智能电网的实施基础。自从关于变电站自动化通信体系的 IEC 61850 国际标准诞生以来，智能变电站的研究、开发和工程实施成为电力行业的热点之一，这也正切合了智能电网对变电站的要求，那就是在变电站侧利用现代量测技术、现代网络通信技术、现代自动化控制技术实现一套全数字化量测、控制、保护、应用等的变电站自动化系统。

本书从智能变电站概念、特征、构成、体系入手，深入浅出地介绍了有关智能变电站的基本理论，并根据工程研发及实施，详细阐述了智能变电站开发过程中的技术难点及解决方案。本书的出版，可以作为变电站自动化领域的相关从业者的技术培训和研发的辅助教材，对智能变电站在中国的推广和普及起到积极的推动作用，从而为我国的智能电网的研究和建设提供有益的帮助。

白晓民

前 言

我们正处在信息化时代，现代电子技术、计算机技术和互联网技术的发展和广泛应用使得信息的生成、加工和传输自动化成为可能。从“数字化地球”、“数字化办公”、“数字化工厂”甚至到“数字化家庭”，都对信息的数字化处理技术提出了更高的要求。

世界范围内正面临着能源短缺与经济发 展的矛盾，电力工业作为基础的能源工业，目前正面临着安全运行、减员增效的巨大挑战。作为电网的数据源和执行终端，变电站内一次设备的安全稳定运行起着极为关键的作用。变电站自动化系统是由一整套的具有智能处理和网络通信的电子装置，用来保障变电站一次设备安全运行（包括继电保护、控制、测量、故障录波、计量、自动装置等）所构成的综合性的二次系统。

变电站内的数字化技术起步于 20 世纪 80 年代末期，微处理器芯片开始应用于变电站自动化装置。实现遥测、遥信、遥控、遥调这“四遥”功能的远方终端装置 RTU 就是信息数字化在变电站内的首次应用，通过 TA/TV、变送器、A/D 转换电路将一次高压侧的电流电压等运行信息转换成计算机可以识别和处理的数字信号，并通过远动规约传送到远方的控制中心，从而在计算机的屏幕上以直观的方式实时显示出来。从此，变电站内的信息数字化处理技术随着微电子技术、计算机技术、网络通信技术的发展而得到快速的提高和进步。至 20 世纪 90 年代末期出现了采用现场总线技术、交流采样技术为特征的全分布式变电站综合自动化系统，将变电站自动化技术发展推到一个新的高峰。但新的困扰随之而来，那就是不同厂家、不同年代、不同功能之间的自动化设备或系统间的互连互通问题，成了制约了变电站自动化系统发展的瓶颈，降低了系统的安全性和稳定性，增加了系统的集成难度和费用。

国际标准 IEC 61850 就是顺应这种需求而诞生的。由于采用面向对象建模、应用与通信协议栈分离、总线技术和 XML 技术等，使得 IEC 61850 标准成为建设数字化变电站的核心指导规范。与此同时，随着微电子技术的不断发展，电子式互感器、高压智能设备等逐渐在变电站开始推广应用，标志着变电站内的信息数字化从源头上有了质的飞跃。

近年来，随着智能电网的建设发展，智能变电站的概念也提了出来，从某种程度上说，智能变电站正是以数字化变电站的形态来建设的。数字化是手段，智能化是目标。因此，智能变电站脱离不开我们一直以来进行的数字化变电站的研究和建设工 作。

本书前半部分主要从智能变电站的定义、特征、系统构架、网络通信、IEC 61850 国际标准、智能高压电器等方面进行了详细的阐述，以期给读者一个对智能变电站的清晰的认识和了解。本书的后半部分主要阐述了智能变电站的开发和实现，分别从过程层、间隔层、站控层的角度，详细讨论了具体的需求和可能的实现途径。本书的最后选编了国内外几种典型的智能变电站工程实施案例。

本书的作者主要是在第一线从事智能变电站的科研人员，大都亲自参加了多个智能（数字化）变电站的工程项目，在智能变电站的构成、原理及运行机制和现场施工有着丰富的经验；也有在高校从事相关技术研究多年的学者。全书由中国电力科学研究院覃剑博士/教授

级高工主编；第1章由中国电力科学研究院的李永亮高工编写；第2章由中国电力科学研究院的王庆平博士编写；第3章的3.6.2由中国电力科学研究院的李刚高工编写，第3章的其余部分由李永亮编写，李永亮校核；第4章的4.5和4.6由中国电力科学研究院的苏瑞高工编写，第4章的其余部分由李永亮编写，李永亮校核；第5章由中国电力科学研究院的郭宁明工程师编写，由中国电力科学研究院陈祥训教授校核；第6章的6.3和6.4.4由中国电力科学研究院的李冰高工编写，第6章的其余部分由北京交通大学的常广博士编写，北京交通大学王毅教授校核；第7章由北京交通大学的鄢素云博士编写，王毅校核；第8章由中国电力科学研究院李刚高工编写，王庆平校核；第9章的9.3由苏瑞高工编写，9.4.2由郭宁明工程师编写，其余部分由中国电力科学研究院的王冬青博士编写，王庆平校核；第10章的10.4.4、10.4.5和10.6由华北电网有限公司的刘巍高工编写，第10章的其余部分由中国电力科学研究院的张鹏高工编写，王庆平校核；第11章由李永亮高工编写。

本书可供广大电力系统工程技术人员和科研、高校师生学习和研究智能变电站时阅读参考。

由于编者水平有限，再加上时间仓促，书中一定会有不足之处，敬请读者给予谅解并提出宝贵意见。

编者

2010年12月

目 录

序	
前言	
第 1 章 智能变电站概述	1
1.1 变电站与变电站自动化	1
1.2 智能变电站的概念	3
1.3 智能变电站的主要研究内容	5
1.4 智能电网与智能变电站	7
1.5 小结	12
参考文献	12
第 2 章 智能变电站的体系结构	13
2.1 传统变电站自动化的体系结构	13
2.2 智能变电站系统结构设计原则	20
2.3 智能变电站的体系结构	23
2.4 智能变电站的技术特征	31
2.5 小结	32
参考文献	33
第 3 章 IEC 61850 标准及其关键技术	34
3.1 IEC 61850 标准概述	34
3.2 对象建模技术与对象模型	44
3.3 特定通信服务映射 SCSM	53
3.4 变电站配置语言 SCL 与系统集成	59
3.5 工程管理和系统测试	69
3.6 一致性测试	74
3.7 IEC 61850 第二版	76
3.8 IEC 61850 与智能变电站的关系	82
3.9 IEC 61850 对智能电网的作用与意义	83
3.10 小结	85
参考文献	85
第 4 章 智能变电站网络通信技术	87
4.1 变电站通信技术的发展过程	87
4.2 智能变电站通信技术基础	89
4.3 ASN.1 编解码规范	97
4.4 制造报文规范 MMS	103

4.5	站内网络通信系统	108
4.6	总线技术	117
4.7	与远方控制中心的通信模式	124
4.8	小结	127
	参考文献	127
第5章	电子式互感器	129
5.1	传统互感器	129
5.2	电子式互感器分类	130
5.3	电子式互感器的基本结构及工作原理	132
5.4	电子式互感器基本特点	141
5.5	电子式互感器数据接口	145
5.6	电子式互感器的试验技术	148
5.7	电子式互感器的应用	151
5.8	小结	152
	参考文献	153
第6章	智能电器	154
6.1	电器及其智能化	154
6.2	智能电器的发展	156
6.3	智能电器的构成	161
6.4	智能电器关键技术	162
6.5	电器本体的智能化	173
6.6	新型成套电器设备	183
6.7	小结	186
	参考文献	187
第7章	变压器智能监测	192
7.1	变压器在线监测技术	192
7.2	变压器局部放电监测	196
7.3	变压器油色谱分析监测	201
7.4	变压器故障分析与诊断技术	205
7.5	变压器状态智能预警技术	210
7.6	智能变压器	213
7.7	小结	215
	参考文献	216
第8章	过程层关键技术	220
8.1	过程层的设备及其实现的功能	220
8.2	过程层的关键技术	221
8.3	合并单元	227
8.4	智能终端	234
8.5	小结	236

参考文献	237
第 9 章 间隔层关键技术	238
9.1 变电站的 IED	238
9.2 间隔层的设备及其实现的功能	239
9.3 间隔层 IED 的通信实现	240
9.4 间隔层 IED 不同功能的实现	245
9.5 间隔层 IED 功能的测试	253
9.6 间隔层 IED 功能的整合和优化	254
9.7 小结	255
参考文献	255
第 10 章 站控层关键技术	257
10.1 站控层系统的形成和发展	257
10.2 站控层系统的构成和功能要求	258
10.3 站控层的关键技术	263
10.4 站控层的实现方法	268
10.5 与控制中心的数据通信	278
10.6 网络安全	279
10.7 站控层技术的发展趋势	280
10.8 小结	282
参考文献	282
第 11 章 智能变电站的应用实例	283
11.1 实现模式	283
11.2 德国 380kV Nehden 站智能开关间隔示范工程	287
11.3 墨西哥 230kV La Venta II 变电站工程实例分析	289
11.4 青岛 220kV 午山变电站工程实例分析	294
11.5 无锡 110kV 圆石变电站工程实例分析	296
11.6 鞍山 66kV 小陀变电站工程实例分析	300
11.7 智能变电站技术发展展望	308
11.8 小结	311
参考文献	311

智能变电站概述

变电站是电网中的重要节点,担负着变换电压等级、汇集电流、分配电能、控制电能的流向、调整电压的功能。变电站自动化系统是针对变电站的安全、可靠运行而建立起来的基于微电子技术、信息技术、计算机技术的安装在变电站当地的一整套计算机控制系统。随着电子式互感器、智能高压电器、高速网络通信技术等的发展,能够为变电站提供更高层次的可靠、高效、稳定、开放的智能变电站系统出现了。智能变电站的实施,将会对电网的安全运行及电力企业的增效减耗提供更有力的支撑。

1.1 变电站与变电站自动化

变电站(Substation)是把一些设备组装起来,用以切断或接通、改变或者调整电压,在电力系统中,变电站是输电和配电的集结点,变电站主要分为升压变电站、主网变电站、二次变电站、配电站等。

1.1.1 变电站在电网中的角色

(1) 节点功能。

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施,它通过其变压器将各级电压的电网联系起来。

变电站起变换电压作用的设备是变压器,除此之外,变电站的设备还有开闭电路的开关设备,汇集电流的母线,计量和控制用互感器、仪表、继电保护装置和防雷保护装置、调度通信装置等,有的变电站还有无功补偿设备。变电站的主要设备和连接方式,按其功能不同各有差异。

(2) 获取电能和电网信息。

测量实际电压和电流的互感器传送有关电力系统最基本的信息。工频频率和当地潮流由这些数值计算而得,或有专用电表直接测量而得。

变电站的开关和输配电线路是电力系统企业主营业务的宝贵资产。其故障或失效不仅会损害设备,而且会导致输送电能的损失,所以要进行设备管理,在变电站中根据所用的检测技术和业主的维修规则监视这些元件的状态。

所有这些在变电站中采用的手段提供了获取电力系统信息的接口,从而可以改变实际拓扑、测量电压电流并获得设备的有关数据。操作人员或保护等自动装置都可以使用这些方法。

1.1.2 变电站自动化系统的概念

变电站自动化系统(Substation Automation System, SAS)是指变电站内能够完成:

- 1) 从当地和远方获取电力系统信息；
- 2) 支持当地手动和自动功能；

3) 在变电站和电网控制中心之间，提供与开关设备的通信连接和接口的各种基于微电子技术的智能电子设备（Intelligent Electronic Device, IED）所构成的变电站运行的实时监视和控制系统。智能电子设备是指包含一个或多个处理器，具有接收来自外部的数据，向外部发送或进行控制能力的装置，如电子多功能仪表、数字保护、控制器等。这些 IED 可以用在控制、测量、保护、防误闭锁、计量、通信等功能上。变电站自动化系统对变电站的安全、稳定运行具有重要的不可替代的作用。

1.1.3 变电站自动化系统的主要功能

变电站自动化系统的功能指的是必须在变电站执行的任务。这些功能完成变电站的设备及其馈线监视、控制、保护。另外，还包括一些变电站自动化系统维护功能，即系统配置、通信管理或软件管理等功能。

- (1) 系统支持功能。
 - 1) 网络管理；
 - 2) 时间同步；
 - 3) 物理装置自检。
- (2) 系统配置或维护功能。
 - 1) 节点标识；
 - 2) 软件管理；
 - 3) 配置管理。
- (3) 逻辑节点运行模式控制。
 - 1) 设定；
 - 2) 测试模式；
 - 3) 系统安全管理。
- (4) 运行或控制功能。
 - 1) 访问安全管理；
 - 2) 控制；
 - 3) 指示瞬时变化的运行使用；
 - 4) 同期分合（定点分合）；
 - 5) 参数集切换；
 - 6) 告警管理；
 - 7) 事件记录；
 - 8) 数据检索；
 - 9) 扰动/故障记录检索。
- (5) 就地过程自动化功能。
 - 1) 保护功能（通用）；
 - 2) 距离保护（保护功能示例）；
 - 3) 间隔联锁；
 - 4) 测量、计量和电能质量监视。

- (6) 分布自动化支持功能。
 - 1) 全站范围连锁;
 - 2) 分散同期检查。
- (7) 分布过程自动化功能。
 - 1) 断路器失灵;
 - 2) 自适应保护(通用);
 - 3) 反向闭锁(自适应保护功能示例);
 - 4) 负荷减载;
 - 5) 负荷恢复;
 - 6) 电压无功控制;
 - 7) 馈线切换和变压器转供;
 - 8) 自动顺控。

1.2 智能变电站的概念

数字化变电站概念的提出,是随着光电技术、网络通信技术、信息技术等在变电站内应用的不断发展而出现的。智能变电站(Smart Substation)相对于数字化变电站在可视化等高级应用方面更为先进。总体来说,关于智能变电站最主要的推动因素如下。

1.2.1 一次高压设备的智能化

开关设备和二次设备之间有开关位置信号、开关告警信号、开关控制信号等信息需要传输,在传统变电站中,这些信息均是以模拟方式通过控制电缆进行传输,所以形成了变电站内电缆沟、电缆层中庞大的二次电缆群。随着适应恶劣环境的光纤网络通信技术的引入,一次开关设备内的状态信号和控制命令可以通过网络通信报文的方式来实现,这就要求一次开关设备具有数字化通信接口,能够根据最佳时刻对断路器进行分合闸操作。国际电工委员会发布的高压开关设备的数字化接口的国际标准是:IEC 62271-3: High-voltage switchgear and control gear-Part 3: Digital interfaces based on IEC 61850。

智能化的一次高压设备主要包括:智能断路器/隔离开关、智能变压器,以及其他电气辅助设备。一次设备被检测的信号和被控制的操作驱动回路采用微处理器和光电技术设计,简化了常规机电式继电器及控制回路的结构,数字程控器及数字公共信号网络取代传统的导线连接。换言之,变电站二次回路中常规的继电器及逻辑回路被可编程序代替,常规的强点模拟信号和控制电缆被光电数字和光纤代替。

电子式互感器技术的发展,也是智能变电站出现的重要因素之一。传统互感器设备笨重、绝缘要求高、有铁芯饱和现象、暂态传变特性差、有开路和短路危险等诸多问题,而电子式互感器具有不受电磁干扰(或影响很小)、不饱和、测量范围大、频带宽、体积小、重量轻等特点。电子式互感器本身就是利用光电技术的数字化设备,可直接与数字化的保护和测控设备接口。

1.2.2 以太网通信在变电站自动化系统中的广泛应用

一次设备的智能化必然会对变电站的网络通信系统提出更高的要求,因此,支持高速的网络通信的变电站二次设备就成了智能变电站的另一主要推动力。

变电站内的二次设备，如继电保护装置、防误闭锁装置、测量控制装置、远动装置、故障录波装置、电压无功控制、同期操作装置以及正在发展中的在线状态检测装置等全部可基于标准化、模块化的微处理器设计制造，设备之间的链接也可全部采用高速的网络通信，而不再出现常规功能装置重复的 I/O 现场接口，通过网络真正实现数据共享。常规的功能装置在这里变成了逻辑的功能模块。

变电站内二次设备之间的互连经历过硬接线、低速但可靠性差的串行通信、中速可靠性有保障的现场总线等阶段。随着计算机技术和网络通信技术的飞速发展，目前 100Mbit/s 甚至 1000Mbit/s 的以太网技术已经成为网络通信的主流。在变电站自动化领域，基于实时的高可靠工业以太网技术的通信网络也已获得广泛应用。

1.2.3 国际标准 IEC 61850 的发布和推广应用

IEC 61850，变电站通信网络和系统（Communication Networks and Systems in Substations）是国际电工委员会为了适应电力行业高速发展所带来的高效、共享互操作、工程集成等要求而制定的针对变电站内 IED 设备的网络通信的国际标准，由技术委员会 TC57 负责，2004 年全部标准发布完毕。IEC 61850 标准共包含 14 个部分，内容涉及变电站自动化的功能规范、硬件指标、信息模型、通信映射、工程描述等，是实施变电站自动化系统的唯一的指导性国际标准。

变电站内的设备之间的信息交互采用基于 IEC 61850 标准的统一信息模型，极大地提高了信息传递的效率和有效性，所有需要与外部智能装置交互的信息用以太网机制实现信息的有效发布，所有智能设备均按统一的标准建立信息模型和通信接口，设备间可实现无缝连接。

1.2.4 多功能的集成智能电子设备 IED 的不断发展

智能电子设备 IED 是一个代表某个物理设备的实体单位，这个物理设备可以是一个保护设备，也可以是一个完成人机会话功能的微机。这些实体在一定范围内以及接口限定的条件下，能够完成一个或多个指定逻辑节点任务。一些实时性要求严格的功能差不多独立的在一个 IED 中完成，其他功能则分布到多个 IED 中完成。

传统的 IED 存在着功能单一、集成度差、对外接口简单低效、信息不规范等缺点。随着微电子技术的迅猛发展，处理能力强、集成度高、支持高速网络通信并遵循 IEC 61850 标准的新一代的 IED 不断出现，这也极大地促进了变电站向数字化、网络化、智能化方向发展。

1.2.5 智能变电站的概念

智能变电站概念的提出，是随着智能电网的提出而出现的，变电站的智能化运行是实现智能电网的基础环节之一。业内普遍认为：智能变电站采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，同时具备支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能。

相比常规变电站，智能变电站的信息量更大、测控范围更宽、处理技术更加智能化，如图 1-1 所示，无论是变电站内、站与调度之间，还是站与站、站与大用户和分布式能源的互动通信能力来看，信息的交换和融合更方便快捷，控制手段更灵活可靠。智能变电站设备具有信息数字化、功能集成化、结构紧凑化、状态可视化等主要技术特征，符合易扩展、易

升级、易改造、易维护的工业化应用要求。

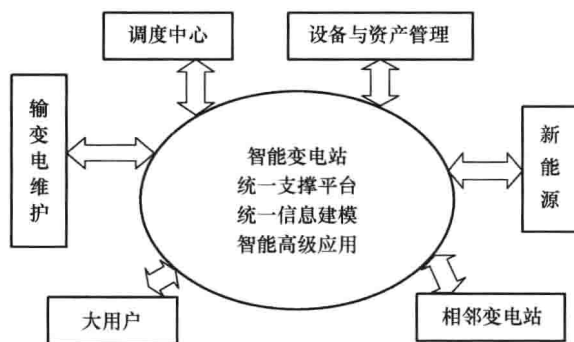


图 1-1 智能变电站概念示意图

智能变电站的构成包括：智能高压一次设备、电子式互感器、合并单元（Merging Unit, MU）、智能化终端（包括智能开关操作箱和主变本体智能终端）、数字化保护测控设备、数字化计量仪表、同步时钟系统、工业级网络交换机、光纤以太网及 IEC 61850 通信标准所组成的全智能化分层分布式的变电站。

1.3 智能变电站的主要研究内容

1.3.1 智能变电站技术体系

研究智能变电站内涵、外延、发展阶段、技术要求等内容。对智能变电站的国内外现状、技术体系、具体实施进程等进行全面研究及评估。研究智能变电站装备体系以及功能体系；研究智能变电站保护及测控体系结构。

1.3.2 智能变电站工程实施

尽管 IEC 61850 标准围绕变电站功能实现，从各方面进行了标准化，但实施过程中，各厂家对其理解的不一致，和标准本身的灵活性、待完善之处，仍导致互操作、集成等方面的困难。

为保证工程实施中对智能变电站通信系统的实时性、完整性、可靠性、安全性、稳定性要求，以及设备互操作、互换性（Interchangeability）要求，必须对灵活度（如功能分配）、扩展度（如模型及扩充）加以限制，在密切跟踪 IEC 61850 标准第二版，研究与国内需求差异的同时，制定国内智能变电站自动化系统结构、设备物理接口、功能分配、通信网络和接口等方面的实施规范。

研究智能变电站的系统配置工具和 IED 设备配置工具。

同时在智能变电站投运后，企业用户在使用、维护过程中，也与传统的变电站系统有着明显的差别，这就需要研究智能变电站的运行规程、维护及作业指导书等。

1.3.3 数据采集控制技术

数据采集控制技术是实现智能变电站各项应用功能的基础。电子式互感器及智能化电器的发展，开创了电力系统一次信息采集的新思路。这些新测量技术对传统的保护、测量、控制、通信等装置也将带来很大影响。