

数字化 电能计量技术

孙卫明 潘 峰 钟 清 林国营 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

数字化 电能计量技术

孙卫明 潘 峰 钟 清 林国营 编著



中国电力出版社

内 容 提 要

本书的主要内容包括数字化电能计量起源、发展现状和关键技术,数字化电能计量系统,电子式互感器工作原理及关键技术,数字化电能表工作原理及关键技术,电子式互感器校验技术,数字化电能表校验技术,电子式互感器校验装置,数字化电能表校验装置。

本书可供数字化电能计量的技术人员使用,还可供高等院校电气工程专业的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

数字化电能计量技术/孙卫明等编著. —北京:中国电力出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5123-6741-8

I. ①数… II. ①孙… III. ①电能计量—数字化 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第256643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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年12月第一版 2014年12月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 32开本 6.875印张 161千字

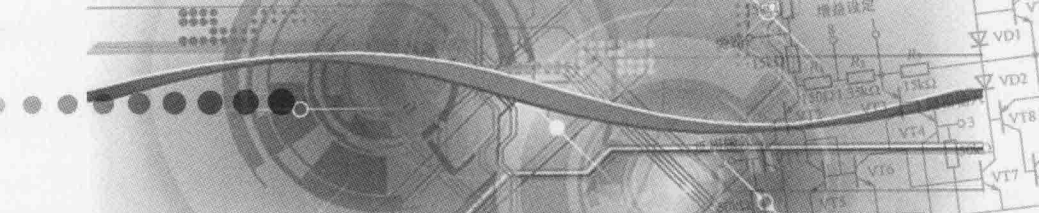
印数0001—3000册 定价25.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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



前 言

当今世界正面临严峻的气候变暖和能源紧缺等问题，电网结构与运行方式变得更加复杂，电力用户用电需求更加多样，电力企业运营压力更加突出。为应对新形势，全世界都非常关注智能电网的研究与建设，加快对新型材料与计算机、微电子、自动化等信息技术在电力系统中的应用研究，并纷纷提出建设适应本国国情的智能电网宏伟蓝图。数字化变电站（智能变电站）是智能电网建设的核心环节，承担电量结算关口与电网安全支撑作用，是实现电力高效传输、电网可靠供电的重要保障。数字化变电站由于采用了电子式互感器等数字化设备以及分层网络传输架构，相对于传统变电站在可靠性、安全性与经济性方面具有显著优势，同时，也带来了电能计量方式与技术体系的颠覆性变化。

数字化电能计量系统应用光电传感、数字信号处理、网络通信等技术，包含电子式互感器、合并单元、网络设备、数字化电能表等单元，在全站统一通信协议下，实现计量功能和相关业务，具有准确度高、抗干扰能力强等特点。自 20 世纪中叶新型传感原理的互感器问世以来，围绕高电压大电流传感技术、互联网技术、电能计量算法等新技术，重新构建电能计量系统已成为研究热点。我国当前在全光纤互感器研究及应用、数字化电能表产业化、工程应用及标准化建设等方面已走在世界各国前列。然而，由于现有电力结算与计量体系是建立在模拟电能量值基础上的，创建数字化电能量值与模拟电能量值的不间断溯源链条以及研制相关检测装置，已成为数字化变电站乃至智能电网发展中亟

待解决的基础性课题。

编者见证了近十年来我国数字化变电站的蓬勃发展以及相关装备技术水平的不断提升,长期致力于数字化电能计量技术、检测与量值溯源体系研究。在 2009 年首次提出了“基于模拟电能基准的标准数字化功率源”以及“电子式互感器采样脉冲同源”技术,研制了适应多种信号类型、满足工程建设需求的数字化电能计量装置检测平台。本书中大量技术成果在全国数字化变电站建设与有关装备制造企业中得到了广泛应用和实践验证,并且可为下一步建立国家层面的数字化电能计量量传体系提供重要参考。

本书从实用的角度,详细介绍了数字化电能计量系统架构、电子式互感器与数字化电能表基本知识、校验方法与装置设计实现、工程应用等。全书分为 8 章:第 1 章介绍了数字化电能计量的起源与发展现状,阐述了数字化电能计量关键技术与系统架构;第 2 章对数字化电能计量系统架构与主要组成单元进行了详细描述;第 3、4 章分别介绍电子式互感器与数字化电能表的工作原理与关键技术;第 5、6 章分别介绍电子式互感器与数字化电能表的校验技术,考虑了多种信号类型与采样同步方式;第 7、8 章分别举例介绍了电子式互感器与数字化电能表校验装置,目的是让读者了解校验装置工作原理与主要功能。

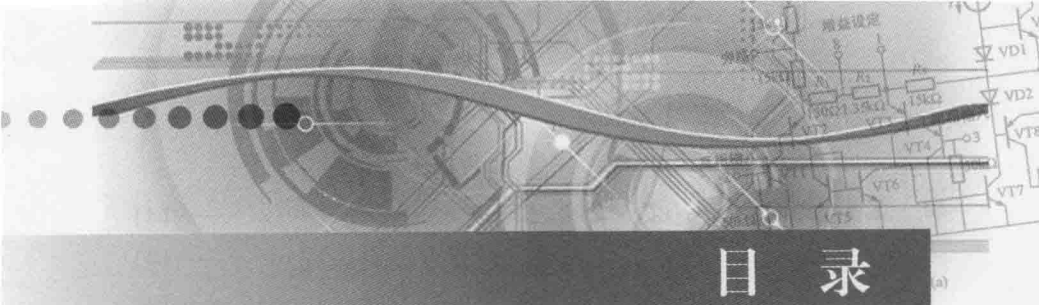
在本书编撰过程中,孙卫明负责编写第 5、6 章和第 1 章部分内容,并负责全书统稿工作;潘峰负责编写第 7、8 章和第 1 章部分内容;钟清负责编写第 3 章和第 4 章;林国营负责编写第 2 章。孟庆亮工程师对第 5~8 章部分内容进行校核,宋强工程师对第 2 章和第 3 章部分内容进行校核。何宏明正高级工程师、肖勇高级工程师对本书的内容提出了宝贵的意见,并在统稿过程中给予了大力支持和直接帮助,在此表示特别感谢。另外,国家高

电压计量站王乐仁正高级工程师，华中科技大学徐雁副教授、肖霞副教授，以及帅航、柏航等同学在本书的编写过程中也给予了大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，兼作者水平有限，书中难免存有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

2014 年 12 月



目 录

前言

● 第1章 绪论	1
1.1 数字化电能计量起源	1
1.2 数字化电能计量发展现状	4
1.3 数字化电能计量关键技术	8
● 第2章 数字化电能计量系统	13
2.1 概述	13
2.2 电子式互感器	17
2.3 合并单元	24
2.4 数字化电能表	29
2.5 电能采集终端和站控层平台	33
● 第3章 电子式互感器工作原理及关键技术	37
3.1 概述	37
3.2 电子式互感器的分类及结构	41
3.3 无源电子式互感器工作原理	51
3.4 有源电子式互感器工作原理	74
3.5 电子式互感器输出接口及通信协议	89
● 第4章 数字化电能表工作原理及关键技术	116
4.1 数字化电能表概述	116
4.2 数字化电能表工作原理及计量算法	121
4.3 数字化电能表的接口及通信协议	132

● 第5章	电子式互感器校验技术	141
5.1	电子式互感器校验技术发展概况	141
5.2	电子式互感器误差校验项目	144
5.3	电子式互感器误差校验原理	153
● 第6章	数字化电能表校验技术	173
6.1	数字化电能表校验技术发展概况	173
6.2	数字化电能表的校验方法	175
● 第7章	电子式互感器校验装置	178
7.1	电子式互感器校验装置的结构和功能	178
7.2	电子式互感器校验装置技术要求	179
7.3	电子式互感器校验装置实例	183
7.4	电子式互感器校验装置的校准方法	189
● 第8章	数字化电能表校验装置	193
8.1	数字化电能表校验装置的定义和类型	193
8.2	数字化电能表校验装置的技术要求	193
8.3	数字化电能表校验装置实例	198
8.4	数字化电能表校验装置的校准方法	204
参考文献		207

绪 论

1.1 数字化电能计量起源

1.1.1 数字化变电站的发展现状

智能电网建设的核心环节是数字化变电站，数字化变电站通过采用先进、集成、环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、电能计量等基本功能，并根据需要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。

在数字化变电站的应用领域，我国一直处于国际领先水平。目前国外基本没有实际投入运行的数字化变电站，而我国已有超过千座以上的数字化变电站投入实际运行。按照国家电网公司规划，2011 年后新建变电站，全部按照数字化变电站的技术标准进行建设，并对之前所建的枢纽变电站和中心变电站等进行数字化改造。截至 2013 年 9 月底，国家电网公司总共新建数字化变电站 656 座，实施改造的数字化变电站 274 座。在总结数字化变电站建设经验的基础上，国家电网公司启动了新一代数字化变电站的建设，在 2013 年底已建成 6 座新一代数字化变电站的示范站，且计划于 2014 年再建并投运 50 座新一代数字化变电站。与此同时，南方电网公司也积极开展数字化变电站的建设，截至 2013 年底，南方电网公司建成并投运的数字化变电站总数已达 453 座。目前，

我国建成的数字化变电站电压等级从 66~750kV, 已经覆盖了绝大部分电网电压范围。按照国家电网公司 2020 年建成统一坚强智能电网的规划, 2015 年大约有一半的新建站都规划建为数字化变电站。

1.1.2 数字化变电站的结构

根据 IEC 61850 标准, 数字化变电站具有 3 层结构, 分别为站控层、间隔层和过程层, 如图 1-1 所示。

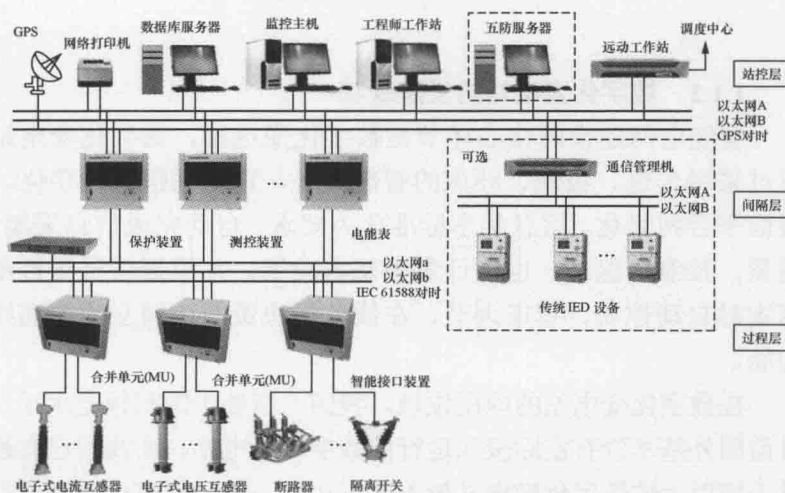


图 1-1 数字化变电站的分层结构

从图 1.1 可以看出, 数字化变电站各层的结构和功能分别为:

(1) 过程层。该层主要包括数字化变电站的一次设备, 例如电子式互感器、智能开关和智能变电压等智能一次设备, 可实现自我检测和自我描述等功能。过程层通过光纤网络给间隔层设备提供一次设备的运行状态信息, 并接收来自间隔层的控制指令。

(2) 间隔层。该层主要包括数字化变电站的监控设备和继电

保护设备等,并且这些设备在横向上按间隔进行配置。间隔层设备的主要功能是实现本间隔的继电保护、测(计)量、监控、故障录波、操作闭锁、同期和自检等功能。间隔层设备通过光纤分别与其他间隔设备、站控层和过程层进行通信。

(3) 站控层。该层主要包括站级的工作站、人机设备、服务器或路由器等设备,实现变电站在线监测、实时控制、故障报警、操作闭锁、记录和自诊断功能、继电保护整定值变更、故障分析以及变电站的远方控制等功能。站控层通过光纤与间隔层进行通信。

1.1.3 数字化电能计量系统的构成

数字化变电站电能计量系统主要包括过程层的互感器(遵循 IEC 60044-7 标准的电子式电压互感器以及遵循 IEC 60044-8 标准的电子式电流互感器)、合并单元(merging unit),以及间隔层的数字化电能表。电子式互感器对电压、电流信号进行采样并将采样数据汇总到合并单元后,经点对点或组网方式发送至间隔层的数字化电能表。数字化变电站电能计量系统结构如图 1-2 所示。

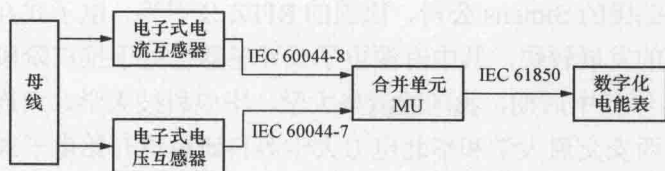


图 1-2 数字化变电站电能计量系统结构图

数字化变电站的蓬勃建设,带动了电子式互感器和数字化电能表的研发、生产和使用。在数字化变电站实现全站信息数字化的要求下,传统变电站中用于电能计量的模拟设备在数字化变电站中不再适用,新的数字化电能计量方式随之产生。

1.2 数字化电能计量发展现状

1.2.1 电子式互感器

20 世纪 60 年代, 国外开始了电子式互感器的理论研究, 但未见挂网试运行, 70 年代国内开始了电子互感器的理论研究, 到 80 年代, 多种电子式互感器样机在国外成功挂网运行。90 年代则是电子式互感器的实用化研制阶段, 电子互感器逐步向高压、超高压和特高压领域深入发展, 1993 年我国电子式互感器实现了挂网运行。21 世纪以来, 我国电子式互感器进入了迅速发展的时期, 先后已有多家单位研制的电子式互感器在 10~750kV 系统上挂网运行, 近 10 年来, 电子式互感器在使用数量和工程应用电压等级方面得到了长足发展, 目前已形成一定的影响力, 并得到了一定程度的认可。2009 年国网启动智能变电站试点工程, 电子式互感器正式进入试点阶段。

国外研究电子式互感器的单位有英国的 Liverpool 大学、瑞士的 ABB 公司、法国的 Alstom 公司、美国的 Photonic Power Systems 公司、德国的 Siemens 公司、德国的 RITZ 公司等。电子式互感器在国外的的发展较快, 其中有源电子式互感器已处于推广阶段。

90 年代中后期, 我国的清华大学、华中科技大学、大连理工大学、西安交通大学和华北电力大学等科研单位开始电子式互感器研究, 经过十几年的研究, 我国研制的电子式互感器已进入了挂网试运行阶段。目前, 我国已有数十家公司研制和生产各类电子式电压、电流互感器, 其典型代表有南瑞继保、南瑞航天、许继集团和南自新宁等。

较传统电流互感器和电压互感器, 电子式电流互感器和电子式电压互感器不含铁芯、没有磁饱和、频带宽、动态测量范围大、线性好, 且体积小、质量轻。特别是电子式电流互感器二次开路

不会产生高电压,电子式电压互感器二次短路不会产生大电流,也不会产生铁磁谐振,根除了电力系统运行中的故障隐患,保证了人身和设备安全。电子式互感器的特点可归纳为以下几点:

(1) 优良的绝缘性能。电子式互感器以光纤为信号传输媒质从高压侧将信号传送到低压侧,充分发挥了光纤绝缘性能好的优点,尤其适合高电压等级的测量。

(2) 实现电流、电压一体化设计,同时提供测量、保护用电流和电压信号。

(3) 传感器、合并单元及数字化电能表都可通过光纤相连,信号在光纤中传输,增强了抗电磁干扰(EMI)性能,数据可靠性大大提高。

(4) 体积小、质量轻、节约空间。电子式互感器无铁芯、无绝缘油,本身质量很轻,给运输和安装带来了极大方便。

(5) 价格低廉的光纤应用,大大降低了电子互感器的整体成本。无铁芯、少铜线及光纤的应用,客观上起到环保、节能的作用。

1.2.2 合并单元

合并单元是数字化变电站新出现的设备。合并单元的作用是将多个电子式互感器输出的数字信号进行时间相关的组合,然后以网络通信的方式将合并值传输到变电站间隔层的数字化电能表等间隔层设备。

在 IEC 60044-7 和 IEC 60044-8 中规定,合并单元可以是电子式互感器的一部分,也可以是一个独立的装置。目前,电子式互感器生产厂家大多将其作为电子式互感器的一部分。所以电子式互感器生产厂家大多都具备生产合并单元的能力。

1.2.3 数字化电能表

数字化电能表不同于感应式和电子式电能表,它不含采样单元,其输入信号为合并单元发送的数字量,其核心任务是进行计

量算法处理。它具有以下优点:

(1) 可靠性高。数字化电能表与合并单元之间的通信采用光纤, 实现完全电气隔离, 保障在各种复杂的电磁环境下不会造成数字电流、电压信号传输干扰。数字化电能表取消了模拟电压和电流信号的输入, 有效消除了过流或二次电流开路等安全事故隐患。

(2) 稳定性高。数字化电能表采用数字信号输入, 无模拟采样电路, 长期运行中有效避免传统电能表因温度、采样电路的电阻电容变化、零漂、电磁干扰等可能对准确度造成的影响。

数字化变电站的大量投运, 带动了数字化电能表的研发、生产和使用。2013年, 国家电网公司对数字化电能表的招标量达到约5万块。目前国内主要的电能表生产厂商, 例如深圳科陆、宁波三星、东方威斯顿等都已认识到数字化电能表的应用前景, 正在将更多的研发生产力量投入到新型数字化电能计量装置的研发和生产上来。与此同时, 多个厂商也在进行数字化电能表校验装置的研发和生产, 例如湖南威胜、深圳星龙、南自集团等。随着智能电网的发展和数字化变电站建设规模的不断扩大, 数字化电能计量装置及相关检测设备将进一步推广和应用。

1.2.4 数字化电能计量系统

传统电能计量系统是由电磁式电压互感器和电流互感器、计量二次回路、电能表和计量柜等用电缆连接形成的回路。传统电能计量系统的误差主要包含电压互感器和电流互感器的误差、二次回路信号传输通道引起的误差以及电能表的误差。然而随着电网输送容量和电压等级的提升, 传统电能计量系统暴露出越来越多的问题: ①由于剩磁的存在, 在高电压大电流下, 互感器容易出现饱和, 导致其准确度下降, 从而降低了电能计量系统的计量准确度; ②高电压等级电网对互感器的绝缘要求更高, 实现更困难; ③电网容量的增大, 使得短路电流亦增大, 传统电磁式电流

互感器难以实现宽范围的准确测量；④数字化变电站技术的发展与成熟使得一、二次设备逐步实现以 IEC 61850 为规约的通信接口，传统电能计量设备难以实现与数字化电能计量设备的互联互通。数字化变电站电能计量系统由电子式互感器、合并单元和数字化电能表构成，相对于传统变电站的电能计量发生了革命性的变化。电子式互感器按照一定的比例关系，将高电压、大电流转换为数字信号，合并单元作为电压、电流等电参量采集与间隔层设备的数字接口，将多个电子式互感器输出的数字信号进行时间相关的组合，以网络通信的方式将合并值传输到变电站的间隔层的数字化电能表等设备。

数字化电能计量系统应用光电传感技术、数字信号处理技术、网络通信等技术，在统一通信协议下，构建计量功能和实现相关业务，能够有效解决目前电能计量系统综合误差过大、易受现场环境干扰等难题。数字化电能计量系统的优点如下：

(1) 数字化电能计量系统中的电压、电流信号以数字量形式传输，可以提高数据的共享率，有利于电能计量系统功能的扩展，也易于其他系统集成和接入。数字化电能计量系统具有测量准确度高、测量范围广、绝缘性能好、安全性高、易扩展和易集成等特点，其中在测量准确度方面的优势主要体现在：消除了传统电能计量装置中互感器引线压降的影响。传统电能计量装置中，互感器输出的模拟信号通过电缆传输时，由于存在导线压降会产生附加误差。而数字化电能计量装置采用光纤传输采样值，传输数字信号无导线压降，引线压降的消除可以提高整个电能计量系统的测量准确度。

(2) 显著提高了电能表的测量准确度。一般情况下，传统电能计量装置中配置的电能表的准确度为 0.2 级。而数字化电能表没有模数转换单元，只有数字量接收和电能计量算法环节，因此可明显提高电能计量的准确度，数字化电能表的准确度可以达到

0.05 级, 甚至 0.02 级。

(3) 光纤传输有效提高了抗干扰能力。电子式互感器与合并单元, 合并单元与数字化电能表之间均采用光纤传输信号。在变电站强电磁干扰环境下, 采用光纤传输信号, 具有突出的抗电磁干扰能力。

目前我国的国家电能计量基准, 还未形成对数字化电能进行直接量传的能力。截至现在研发出的模拟电能转换为数字化电能的电能计量标准装置, 其电能计量结果的不确定度仍较大, 一般为 0.05%, 还无法满足法制电能计量管理中上级计量标准器的准确度应为被检仪器仪表准确度等级的 $1/2 \sim 1/3$ 的要求, 即还不能对数字化电能计量装置开展量传。尽管数字化变电站中装配了准确度更高的数字化电能表, 但由它们所计量的电能量值, 还不能直接用于电能的贸易结算, 即它们已具备的电能计量准确度高优势, 至今还无法得以充分利用。

数字化电能计量量传体系的缺乏, 限制了数字化电能计量装置的应用和推广。尽管数字化电能计量采用了数字化的技术, 但其计量的对象还是模拟的电能量值。因此, 将数字化电能表及合并单元这些新型数字化计量仪器纳入依法管理的计量器具范畴, 保证电能计量的量值统一、准确, 是对开展数字化电能计量和智能电网发展所提出的迫切需求。

1.3 数字化电能计量关键技术

1.3.1 电子式互感器的可靠性和长期稳定性

由于计量原理不同, 数字化变电站中电能计量系统可靠性与传统电能计量系统可靠性侧重点不同, 传统变电站电能计量系统中, 电能表以及二次传输回路的故障率高于互感器。而在数字化电能计量系统中, 电子式互感器是关键设备, 电子式互感器远比

传统互感器复杂,并且用光纤等传输方式代替了二次回路,这种情况下可靠性的重点主要在于电子式互感器。

据国家电网 2013 年发布的对电子式互感器的型式试验和运行情况统计,数字化变电站已挂网的电子式互感器,运行或试运行产品故障率是传统电磁式互感器故障率的数十倍甚至上百倍,故障原因多种多样。如何提高电子式互感器产品可靠性和稳定性,已成为生产厂家面临的最大问题。

可靠性问题成了决定电子式互感器能否最终大批量在电力系统推广应用的关键,所以如何从原理、方法、选材、制造工艺及管理上提高电子互感器自身的可靠性,同时对影响产品稳定性、可靠性的各种因素,进行可靠性评估,将产品的可靠性量化,为产品的实用化提供理论及试验依据是电子互感器发展必须解决的关键问题。

1.3.2 数字化电能表的计量算法

数字化电能表主要完成的工作是数字报文解析和电能计量算法实现。虽然目前已有多个厂家研发出了数字化电能表,但在对通信协议的理解上存在差异,在算法的具体设计上更是不尽相同。实际中,不同厂家的数字化电能表理想工作条件下,准确度达到 0.05%,但在实际运行中误差可达 3%~7%。因此,对报文的有效和正确解析,采用准确度高的电能计量算法,对于研制出具有高准确度的电能计量标准装置等也具有指导意义和实用价值。在报文解析和算法实现方面应解决的关键问题包括:

- (1) 分析通信协议对于采样和量化所存在的固有误差;
- (2) 设计出高准确度的数字化电能表计量算法;
- (3) 分析噪声、丢帧及现场工况条件下的干扰等对数字化电能表性能的影响。

1.3.3 电子互感器和数字化电能表的校验方法及校验装置

数字化电能计量系统与目前广泛采用的模拟量输入式电能