

# 数字电能计量及其电能表检测技术

艾兵, 江波

(四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:**为了适应智能变电站的发展,在新的技术条件基础上需有一套符合数字化变电站特点的计量系统。基于 IEC 61850 标准实施的智能变电站,计量系统结构发生了根本改变。从总体上介绍了智能变电站计量系统及其与传统计量系统的区别。从原理上分析了数字电能表的构造和应用特点,由于计量方式的改变,对其相应数字电能计量检测系统和溯源原理进行了论述,提出了智能变电站中数字式电能表检定方案。由于数字化电能计量暂无国家标准和行业标准,随着智能变电站投运,需进一步开展相关研究。

**关键词:**数字化变电站; 数字式电能表; 检测技术

**Abstract:** In order to adapt to the development of smart substation, it requires a set of measurement system which is consistent with the features of digital substation on the basis of the new technical conditions. The metering protocol structure of the smart substation based on IEC 61850 implementation has changed. The basic information about smart substations and the differences between the electric energy metering system of smart substation and the traditional measurement system are generally described. The configuration and application characteristics of digital watt-hour meter are analyzed. Because the metering type is changed, the corresponding detection system of digital electric energy metering and its traceable principles are discussed, and the examination schemes of digital watt-hour meter in smart substation are proposed. Since there are no national standards and industry standards for the digital electric energy metering, the relevant researches need carrying out with a large number of smart substations being put into operation.

**Key words:** digital substation; digital watt-hour meter; detection technique

**中图分类号:** TM932 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)02-0010-04

## 0 前言

随着数字化技术不断发展,传统的变电站自动化系统已无法满足智能化电网的要求,数字化变电站将是继综合自动化技术后电力系统变电站建设的又一次革新,数字化变电站必将是变电站建设的趋势。它以变电站一、二次设备为数字化对象,以高速网络通信平台为基础,通过对数字化信息进行标准化,实现信息共享和互操作,并以网络数据为基础,实现测量监视、控制保护、信息管理等自动化功能<sup>[1-4]</sup>。IEC 推出了电子式互感器的标准<sup>[5-6]</sup>,关于变电站通信規約的标准也已出台<sup>[7]</sup>,新的标准包含和兼容了原有的标准,这使得智能变电站的建设有了标准依据<sup>[8]</sup>。

电能计量通过互感器及二次回路联合电能表按照规定的接线方式进行组合构成在线电能计量系统来实现的。在电力市场条件下,为保证公开、公平、公正地为电能生产者 and 使用者提供优质服务,必须建立

现代化的电能计量、管理和交易系统。电能计量系统管理是至关重要的<sup>[9]</sup>。随着数字化变电站的发展以及 IEC 61850 协议的不断推广,数字化变电站的建设已由理论研究阶段走向工程实践阶段。

为了适应智能变电站整站实施的要求,有必要在新的技术条件的基础上有一套符合数字化变电站特点的计量和检测系统。由于数字化电能计量暂无国家标准和行业标准,只有通过已有智能变电站的实际运用情况和参照地方标准和行业标准进行。随着数字电路的发展,电路的可靠性和精度得到了提高,必定会推动了数字电能计量快速发展。

下面将总体上介绍智能变电站的构造,基于 IEC 61850 标准的实施,重点讨论分析了数字电能表的构造和应用特点,以及实现功能,另对其对应的数字电能计量检测系统和溯源原理进行了论述。

## 1 智能变电站

智能变电站是指变电站的信息采集、传输处理、

输出过程全部数字化,基本特征为设备智能化、通信网络化、模型和通信协议统一化、运行管理自动化等。数字化变电站建设的关键是实现能满足上述特征的通信网络和系统,并开发出相应的智能设备。IEC 61850标准包括变电站通信网络和系统的总体要求、功能建模、数据建模、通信协议、项目管理和一致性检测等一系列标准。数字化变电站就是按照 IEC 61850 标准建设通信网络和系统的变电站。

数字化变电站的主要一次设备和二次设备都应成为智能设备,这是变电站实现数字化的基础。智能设备具备可与其他设备交互参数、状态和控制命令等信息的通信接口。如果确需使用传统非智能设备,应通过配置智能终端将其改造为智能设备。设备间信息传输的方式为网络通信或串行通信,取代传统的控制电缆、TA 电缆和 TV 电缆等硬接线。数字化变电站的设备状态信息应包括其自身健康状态。设备根据设计相应的在线检测功能,实时提供设备的健康状态信息,变电站自动化系统可根据设备健康状态提出检修要求,实现计划检修向状态检修的转变。

智能变电站不需解决不同制造商设备信息代码表不统一的问题。数字化变电站的设备信息应符合标准的信息模型,具有“自我描述”机制。采用面向对象自我描述的方法,传输到自动化系统的数据都带说明,马上建立数据库,使得现场验收的验证工作大大简化,数据库的维护工作量大大减少,实现设备的“即插即用”。图 1 为智能变电站构成简图。

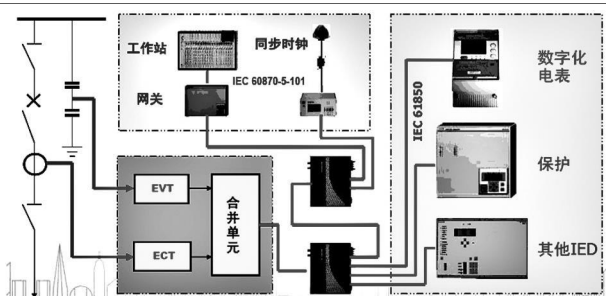


图 1 智能变电站的构成

相对于传统变电站,智能变电站的一次设备采用数字输出的电子式互感器等智能一次设备。一次设备和二次设备间用光纤传输数字信息的方式交换采样值、状态量、控制命令等信息。二次设备间用通信网络交换模量和控制命令等信息,取消控制电缆。运行管理系统自动化包括自动故障分析系统、设状态监测系统和程序化控制系统等自动化系统,提升自动减少运行维护的难度和工作量。数字化变电站的关

键技术 IEC 61850 的体系架构包括一体化功能系统控制单元、通信网络架构、电流/电压互感器、数字化的一次设备、全站统一的授时系统<sup>[10]</sup>。

智能变电站技术的推广,引发了电能计量技术的变革,包括新型电子式互感器的运用、一次侧到二次侧电参量传输的介质改变、电参量传输的信号模式改变、表计计量采用专用芯片与自用算法的数字信号处理、表计的容错处理和表计的检验与溯源等。

前面阐述的全数字计量系统,已在国内多处变电站挂网运行,体现了全数字计量的技术优势。四川北川永昌智能 110 kV 智能变电站的建设,为深入推进电网建设、打造坚强智能电网开启了一个新的开端,为数字化技术继续推广应用奠定了良好的基础。

## 2 数字电能计量系统

数字互感器投入运行后,在数字计量系统中电流、电压信号采用 IEC 61850-9-1 标准或 IEC 60870-5-1 的 FT3 格式,随着光纤技术以及光通讯技术的发展,以及光纤通信自身优良的抗电磁干扰性能,互感器与电能表之间采用光纤传输系统。数字化变电站采用输出数字信号电子式互感器,数字化的电流、电压信号在传输到二次设备和二次设备处理的过程中均不会产生附加误差,无 TA 饱和问题,提升了保护、测量和计量等系统的系统精度<sup>[11-13]</sup>。图 2 为全数字计量系统原理框图。

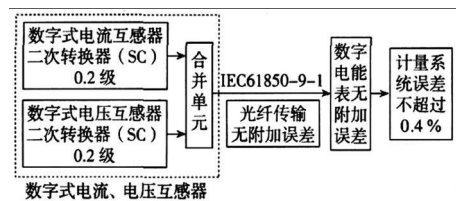


图 2 全数字计量系统框图

数字式电能表是通过接收光电互感器的光纤传送的数字化电流电压信号后,实时运算和 CPU 系统对该数据进行处理,处理后产生的各类数据实时存入 FRAM 并通过液晶显示接口进行动态显示。该系统遵循 IEC 61850-9-1/2 (数字化变电站内通信规约)协议的全新的数字接口式多功能电能表,采用当今世界流行的高档电能表设计方案,数字信号处理器与中央微处理器相结合的构架,将数字信号处理器的高速数据吞吐能力与中央微处理器复杂的管理能力完美结合。通过协议处理芯片获取合并单元的数据

协议包, 传送至数字信号处理单元完成对电参量测量、电能累计以及电能的计算等任务, 后与中央微处理器进行数据交换, 由中央微处理器最终完成表计的显示、数据统计、储存、人机交互、数据交换等复杂的管理功能。其整表硬件原理框图如图 3 所示。

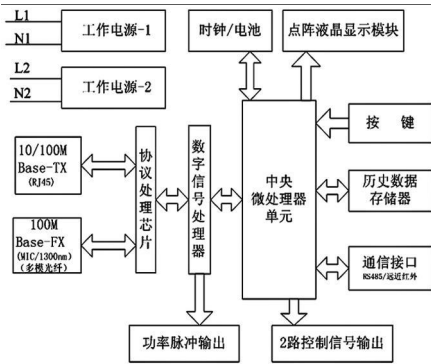


图 3 数字式电能表原理框图

三相三(四)线数字化多功能电能表的研发与生产符合以下标准:

DB43/T 558—2010《数字化电能表》

GB/T 15543—1995《电能质量 三相电压允许不平衡度》

GB/T 17882—1999《2级和 3级静止式交流无功电能表》

GB/T 17883—1999《0.2S级和 0.5S级静止式交流有功电能表》

DL/T 614—2007《多功能电能表》

DL/T 645—1997《多功能电能表通信规约》

IEC 61850—9—1/2《数字化变电站通信规约》

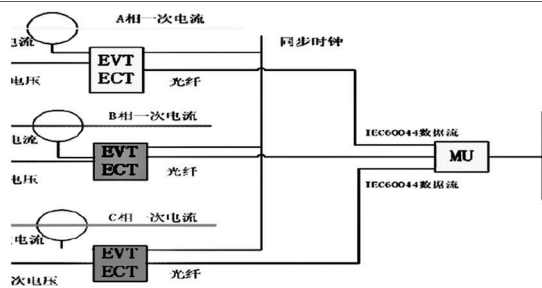


图 4 数字电能表计量系统

设计成的三相三(四)线数字化多功能电能表可通过计量参数设置使能为三相三线或三相四线计量模式。三相数字化多功能电能表符合 DB43/T 588—2010《数字化电能表》标准的 0.2S级和 0.5S级三相电子式多功能电能表。其主要特点为计量信号为数字流输入、高速的数据处理能力、电源采用双路外接电源供电。适用于采用 IEC 61850—9—1/2标准协议的电能计量体系。电能表基本参数一般设置如表 1。

表 1 电能表基本参数一般设置

项目	技术参数
工作电源	交流 (110~220 V) 直流 (220 V ± 20%)
参比频率	50 Hz/60 Hz
接口类型	光纤接口 SC (光波长 1300 nm / 多模光纤 / 100 M)
准确度等级	总有功: 0.2S 无功: 1级
工作温度	-0~55 °C (点阵液晶显示模块低温限制)
极限工作温度	-0~65 °C
相对湿度	≤ 95% (无凝露)
功耗	< 8 W, 15 VA
MTBF	≥ 1.5 × 10 <sup>5</sup> h

数字化电能表在实现功能方面与传统电子式电能表一致, 可以实现分时计量, 可计量分相元件的正、反向有功, 四象限无功及感、容性无功电能。月电量统计及实时测量三相电压、电流、功率、功率因数、频率。可记录失压、失流、断相、数据无效、装置失电及自检功能。最大需量可计量有、无功最大需量及出现时间, 最大需量的积分周期和滑差步进时间。另外可以实现结算数据记录、负荷曲线记录可记录最近 36 天或者更长时间的日负荷曲线, 以及其他事件记录等主要功能。具有无源四路脉冲输出和三路测试脉冲输出, 内部设置硬时钟电路。提供了一个 USB 接口, 可通过软件对电表进行编程。电表计量总及 6 个费率的输入 输出有功、输入 输出无功及四象限无功电能, 四象限定义详见图 5 所示。

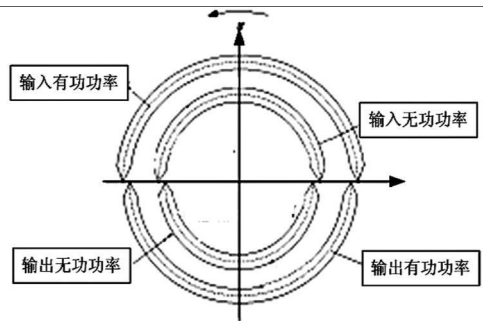


图 5 有功和无功功率的几何表示

由于选择数字化电能表暂无国家标准, 一般设计有功准确度等级为 0.2 S 级, 无功准确度等级为 1 级, 无功 1 级是参照 GB/T 17215《1级和 2级静止式交流有功电能表》标准检定而得到的。

数字化的电流电压信号在传输到二次设备和二次设备处理的过程中均不会产生附加误差, 提高了计量的精度, 减少了二次回路接线, 降低了变电站建设的投资。电能计量二次回路采用光缆, 回路上传输的是数字信号, 一方面提高在二次回路上工作的安全性, 另一方面减少了运行维护的工作量。因为二次回

路上无功功率传输,就没有二次压降和功率损耗,传统的二次电压降测试工作将不需要进行,电能表直接计量一次值,电能表抄读示值即为电量,可以减少由于倍率错误或计算错误带来的失误。

### 3 电能计量检测系统

数字电能表本身可以做到无误差,因此数字电能表校验仪对数字式电能表进行的误差测试本质上是对电能表通信误码率以及电能表的算法误差进行定级,这和常规电子式电能表校验仪有本质的不同。数字电能表的工作方式导致传统电能表校验台(仪)无法对数字电能表进行检定工作,有必要重新设计一个校验装置。该装置必须具备以下几个功能。一是具备光纤以太网接口;二是链路层可采用 IEC 61850-9-1 或 FT3 标准格式,在电子式互感器标准中,数字输出的格式为 IEC 61850-9-1 或 FT3 格式,但按照 IEC 61850 建设的数字化变电站,可能存在电流、电压信号按照 IEC 61850-9-2 标准提供给二次设备的情况,因此电能表校验仪也应具备 IEC 61850-9-2 扩展能力以适应这种应用需求。三是具备电度计算的功能;另外该检测系统可接收被校电表输出的脉冲信号,并进行比较,做误差分析;再者就是必须具备保留历史数据的功能,以备后续查看。

按照上述电能检测系统的要求和原则,该系统的溯源原理如图 6 所示。

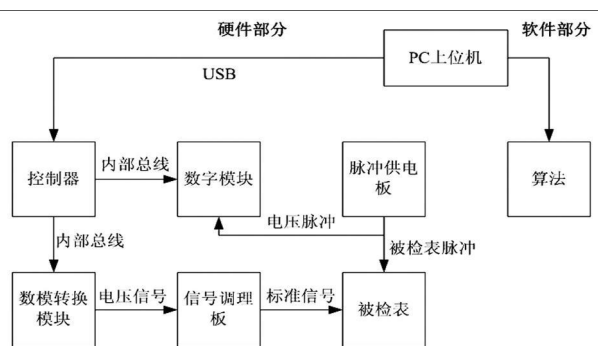


图 6 溯源原理示意图

图中电能表校验仪配置出符合 IEC 61850 标准的数字电流、电压信号,通过光纤传给数字电能表,电能表进行电度计算后,输出校验脉冲。电能表校验仪中有标准电能运算模块,根据配置好的电流、电压数据源计算出电能基准。电能表校验仪采集到校验脉冲后,与自身计算出的标准电度量比较,得出电能表误差,图 7 为数字式电能表检测方案。

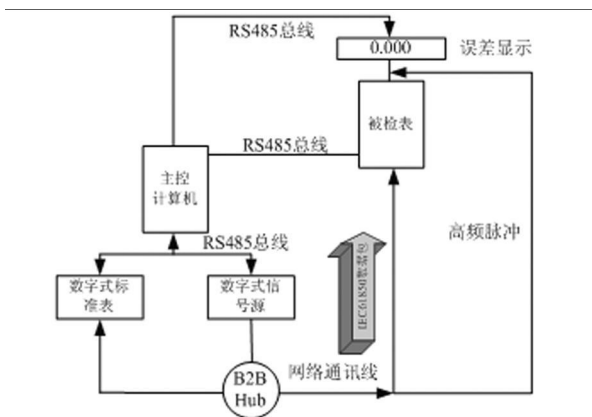


图 7 数字式电能表检测方案

在现有测试标准和 IEC 61850-9-1(2)协议下,实现测试电能表的功能测试,如分时、需量、事件记录、负荷曲线等电能表的计量溯源测试。一般试验检测项目明细表如下。

表 1 数字式电能表检定项目

序号	试验项目	
1	通用要求测试(外观、标志等)	
2	基本误差	
4	起动试验	
5	潜动试验	
6	准确度要求试验	计度器总电能示值误差
7		日计时误差
8		需量示值误差
9		时钟准确度
10	数字量输入输出物理层连接中断测试	
11	数字量输入输出协议符合性测试	
12	通信功能	通信接口物理性能试验
13		数据帧丢帧误差试验
14	一致性试验	误差变差试验
15		负载电流升降变差

在做随机丢帧试验检定时,被试样品输入为额定电压额定电流时,在功率因数为 1.0 和 0.5 L 的负载点进行试验,输入报文以 0.01% 的概率丢失采样值,规定被试样品的误差不应超过相应误差等级的极限。另外可以设置固定丢帧测试(固定时间丢帧,时间可自己设定,例如 80 采样点,4 k/1),被试样品输入为额定电压额定电流时,在功率因数为 1.0 和 0.5 L 的负载点进行试验,输入报文以固定时间丢失采样值,同样地被试样品的误差不应超过相应误差等级的极限。

### 4 结 语

以上系统地阐述了智能变电站的基本构造和运

(下转第 17 页)

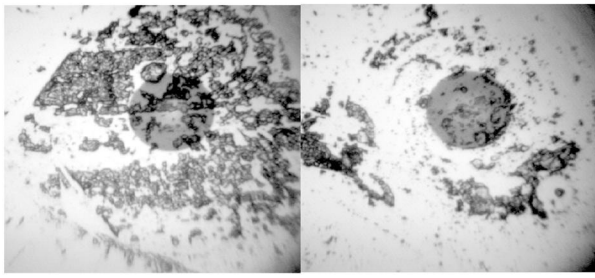


图 2 光纤端面污秽

置正确,而要保证智能变电站监控系统各信号正确,除了要保证后台计算机的软件和数据库正确外,还要保证通信链路和装置的配置软件正确对应。ICD 文件中对于逻辑节点的配置如出现缺失、错误或错位,则容易发生信号异常。因此在今后的调试工作中应当对装置的 ICD 文件配置给予高度重视。

#### (4) 综合分析监控系统通讯不畅的原因

在试验过程中多次出现保护测控装置不能联网通信的现象,导致信号丢失或无法操作。经分析,除

了装置 ICD 配置文件容易出现问題外,还可能由于下述原因引起:光纤收发反接、光纤接线错位、光纤链路受损(如被电焊机烧蚀、机械压力或转角过小导致光缆受损)、交换机 VLAN 划分错误造成信息包的标签错误、交换机端口镜像错误配置、以太网 A/B 子网段划分不合理导致负载不均衡、后台计算机数据库配置错误等等。

## 4 结束语

由于智能变电站大量引入了网络通信技术,使得通信和平台软件调试在整个调试工作中占用相当大的工作时间和工作量,要求调试人员要在常规变电站的调试技术上,不断提高相关通信硬件和软件方面的专业水平,提高监控和保护综合调试能力,适应电子式互感器运用带来的一二次设备的融合和发展,才能满足未来智能变电站调试工作的需要。

(收稿日期:2011-01-04)

(上接第 13 页)

行方式,结合电子式互感器输出信号的特点及计量有关标准,重点讨论了数字式电能表工作方式和原理,并对其对应的数字电能计量检测系统和溯源原理进行了论述,在具体的技术下提出了数字式电能表检定方案,可供有关工程技术人员对数字化变电站调试参考。

随着对智能变电站电能计量和检测新技术进行积极的研究探讨,逐步积累智能变电站运行经验基础上,电能表的标准体系逐渐完备,数字化变电站计量技术相关试验及检测标准即将形成规范。智能变电站是电力系统发展的必然趋势,是通讯技术、信息技术和计算机技术发展的必然结果。

## 参考文献

[1] 李来伟,李书全,孙晓莉.面向 21 世纪的电能计量装置——浅谈电能计量装置的发展与未来[J].电力设备,2004(4):1-4.  
 [2] 马伟,张晓春.数字化变电站的建设与研究[J].价值工程,2010,29(13):164-165.  
 [3] 高翔.数字化变电站应用技术[M].北京:中国电力出版社,2008.  
 [4] 包红旗.HGIS 与数字化变电站[M].北京:中国电力出版社,2009.  
 [5] IEC 60044-7. Instrument Transformers Part 7 Electronic

Voltage Transformers[S]. [S 1]: IEC. 1999.  
 [6] IEC 60044-7. Instrument Transformers Part 8 Electronic Current Transformers[S]. [S 1]: IEC. 2002.  
 [7] IEC 61850. Communication Networks and Systems in Substations[S]. [S 1]: IEC. 2003.  
 [8] 赵丽君,席向东.数字化变电站技术应用[J].电力自动化设备,2008(5):118-121.  
 [9] 李静,杨以涵,于文斌,等.电能计量系统发展综述[J].电力系统保护与控制,2009,(37)11:130-133.  
 [10] Kojovic L, Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement of Power System[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 47-52.  
 [11] Bohnert K. Fiber-optic Voltage Sensor for SF<sub>6</sub> Gas-insulated High-voltage Switchgear[J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 1926-1932.  
 [12] Cease TW, Johnston P. A Magneto-optic Current Transducer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 548-555.  
 [13] Sawa T, Kurosawa K, KAMINISHI T, et al Development of Optical Instrument Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 884-891.

## 作者简介:

艾兵(1985),男,工程师,主要从事电能计量和互感器相关的研究;

江波(1953),男,高级工程师,长期从事互感器和电能计量的研究。  
(收稿日期:2011-01-04)