

电能计量系统发展综述

李静, 杨以涵, 于文斌, 张国庆, 宁伟红

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 基于互感器、电能表和二次接口等方面回顾了电能计量装置的发展历程和原理, 对 21 世纪现代电能计量装置的发展趋势进行了展望, 指出数字化、智能化、标准化、系统化和网络化是现代电能计量系统发展的必然趋势。另外, 还介绍了几个新型互感器 (Rogowski 光电式电流互感器、法拉第磁光效应互感器和光学电压互感器), 特殊功用的新型电能表 (单相电子式复费率电能表、三相预付费电表和数字式电能表) 和几种常用电能计量芯片。

关键词: 电能计量; 互感器; 计量芯片

Review of electric energy metering system

LI Jing, YANG Yi-han, YU Wen-bin, ZHANG Guo-qing, NING Wei-hong

(Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper looks back the developing history and theory of electric energy metering device based on the transformer, metering meter and secondary interface, views the developing trend of electric energy metering device of 21st Century and points out that the developing inexorable trend of present power metering system is digitalization, intellectronics, standardization, sytematize and network. Also, it introduces some new types of transformers, including Rogowski photoelectric current transformer, Faraday magnet optical effect transformer and optics voltage transformer, electric energy metering devices for special purpose, containing single-phase electronic multi-rate electric energy meter, three phase pre-pay electric energy meter and digital electric energy meter, and some usual metering chips.

Key words: electric energy metering; transformer; metering chip

中图分类号: TM71; TM93 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0130-05

0 引言

电能计量是通过互感器及其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和服务者提供优质服务, 必须建立现代化的电能计量、管理和交易系统。电能计量系统作为提供电能计量的信息源头, 对电能计量和管理是至关重要的^[1]。

1 发展历程

1.1 从电磁式互感器到电子式互感器

1.1.1 电磁式电流互感器和电压互感器

电磁式互感器的工作是基于电磁感应原理, CT 的额定输出信号为 1 A 或 5 A, PT 的额定输出信号为 100 V 或 $100/\sqrt{2}$ V。长期以来, 电磁式电流互感器和电压互感器在继电保护和电流测量中的作用一直

占有主导地位, 但是随着超高压输电网络的迅速发展和供电容量的不断增长, 传统的电磁式互感器已经难以胜任这种工况, 因为与这种系统相匹配的电磁式互感器有以下缺点: ①绝缘难度大、防爆困难、安全系数下降, 特别是 500 kV 以上高压系统, 因绝缘而使得互感器的体积、质量及价格均提高; ②带有铁心结构且频带很窄, 动态范围小, 电流较大时, PT 会出现饱和现象, 影响二次保护设备正确识别故障; ③互感器的输出信号不能直接与微机化计量及保护设备接口; ④易产生铁磁谐振等^[2]。

1.1.2 电子式互感器

随着光电子技术的迅猛发展, 一种结构简单、线性度良好、性能价格比高、输出范围宽且易以数字量输出的无铁心式新型互感器—电子式互感器应运而生。

国外于 20 世纪 60 年代初, 我国从 20 世纪 80 年代开始研制光电式电压互感器和电流式互感器, 现今均已部分挂网试运行。

(1) 光电式电压互感器 (OTV)。它基于 Pockels

电光效应, 由光学电压传感头与相应的电子测量电路组合而成。

(2) 光电式电流互感器 (OTA)。主要分为无源型和有源型 2 种类型。无源型电流互感器是以法拉第磁光效应为原理设计制造的装置, 有源型电流互感器是以罗柯夫斯基空心线圈为基础。

北京许继电力光学技术有限公司自主研发的基于法拉第磁旋光效应原理的光学电流互感器(OCT)利用光学电流自愈传感技术和抗磁场干扰结构技术解决了法拉第磁旋光效应光学电流互感器两大世界性难题: 测量精度的温度漂移问题和长期稳定运行问题, 标志着其研制的磁旋光效应光学电流互感器具有工程实用化前景。

1.2 从机械式电能表到电子式电能表

1890 年, 弗拉里发明感应式电度表, 在本世纪得到迅速普及应用, 至今已有百余年的历史。随着科学技术的进步, 电能表的发展已经历了三个主要的发展阶段^[3]。

第一阶段: 本世纪 60 年代以前, 电能表基本上采用电气机械原理, 其中应用最多的是感应式电能表。感应式电能表采用电磁感应原理制成, 包括两个固定的铁心线圈和一个活动的转盘。当线圈通过交变电流时, 在转盘上感应产生涡流, 这些涡流预交变磁场相互作用产生电磁力, 从而引起活动部分转动, 产生扭矩。

第二阶段: 感应式电能表具有经久耐用、价格低廉、制造技术较为成熟等优点。然而, 传统的感应式电能表就其原理和结构来看, 机械磨损、机械阻力、放置角度、外磁场、温度等不同因素会造成种种误差, 要进一步提高测量精度是有限的。为了克服感应式电能表的缺陷, 从 70 年代起, 人们开始研究并试验采用模拟电子电路的方案。到了 80 年代, 大量新型电子元器件的相继出现, 为模拟电子式电能表的更新奠定了基础。在 1976 年日本就研制出电子式电能表, 从此以后进一步准确测量交流电参量, 包括电压、电流、功率、电能计量等成为测量领域的主攻方向和热门课题。

第三阶段: 从 90 年代末数字采样技术应用于电功率的测量, 数字采样技术的电子式电能表是以处理器为核心, 对数字化的被测对象进行各种判断、处理和运算, 从而实现多种功能。90 年代数字采样技术的电能表在工业发达的国家迅速发展, 相继出现了多种寿命长、可靠性高、适合现场使用的电子式电能表; 1.0、0.5、0.2 级精度计量标准适应电力系统中电能计量的要求, 从而使电子式电能表相继实现商业化应用, 而且当时最高的精度已经达到了

0.01 级。数字采样技术方案所具有的优点十分明显, 例如寿命长、准确度高、维修方便、功耗低等。从本质上讲, 数字采样的电子式电能表是最容易和当前蓬勃发展的计算机技术相结合, 使得各种复杂的控制自校准数据传输功能都可以很方便地用于电能表中, 因而有很强的生命力。

电子式电能表的核心计量芯片按工作原理可分为两种: 一种采用 DSP 技术、以数字乘法器为核心的数字式计量芯片, 它运用了高精度快速 A/D 转换器、可编程增益控制等最新技术, 即 System on Chip(SoC)技术设计开发平台, 国际先进水平的深亚微米高性能电能计量芯片片上系统 (SoC) 设计平台将 DSP 内核、可编程增益控制电路、高精度高速 A/D 转换器、电压基准电路以及其他相关外设集成到一片芯片上, 使系统许多方面的性能得以提高; 另一种是以模拟乘法器为核心的模拟计量芯片。这两种芯片的基本工作原理有根本的不同, 在计量精度、线性度、稳定性、抗干扰性、温度漂移和时间漂移等方面, 数字式芯片远远优于模拟式芯片。

以数模混合数字信号处理技术为核心的一系列适于不同场合的常用单相和三相电能计量芯片有: ①普通单相电能计量芯片 AD7755; ②复费率、预付费及集中抄表单相专用芯片 AD7756; ③防窃电单相专用电能计量专用芯片 AD7751; ④数字式单相视在电能表计量芯片 CS5460A; ⑤普通功能三相电能计量芯片 ADUC812; ⑥高精度多功能三相电能计量芯片 AD73360; ⑦低成本、多功能三相电能计量芯片 AD7754; ⑧数字式三相视在电能表计量芯片 ADE7753 等。

总之, 电子式电能表以它的精确度高、稳定性好、可高倍过载、功能扩展性好和环境适应性强等优势已被电力企业和用户广泛认可与接受, 由电子式电能表取代机械式电能表已是大势所趋。

1.3 从复杂的二次回路接线到合并单元的数字信息输出

电子式互感器定义了一个新的物理元件——合并单元。它连续时间合成来自二次转换器的电流及电压数据, 即它的任务是将接收到的二次端信号转换为标准数字输出, 同时使接收到的同一协议的信号同步。合并单元将 7 只以上的电流互感器 (3 只测量, 3 只保护, 1 只备用) 和 5 只以上的电压互感器 (3 只测量、保护, 1 只母线, 1 只备用) 合并为一个单元组, 并将输出的瞬时数字信号填入到同一数据帧中, 体现了数字信号的优越性。数字输出的电子式互感器与外部的通讯通过合并单元实现^[4]。利用电子式互感器输出的数字信号, 使用现场总线

技术实现点对点、多个点对点或过程总线通信方式, 将完全取代大量的二次电缆线, 彻底解决二次接线复杂的问题, 可以简化测量或保护的系统结构, 减少误差源, 有利于提高整个系统的准确度和稳定性, 实现真正意义上的信息共享。

2 几种特殊功用的新型互感器和电能表

2.1 互感器

2.1.1 Rogowski 光电式电流互感器

光电式电流互感器 (OTA) 虽然具有显著优点, 但由于它对温度、振动的敏感性及其长期工作的时间稳定性尚待进一步解决, 加上其传感头制作要求高、价格昂贵等问题, 限制了其推广使用。如果在光电式电流互感器中使用 Rogowski 绕组, 则能较好解决上述问题。

在 Rogowski 光电式电流互感器绕组的两端接上合适的电阻就可测电流, 由于绕组导线均匀地绕在一个非磁性环形骨架上, 它通过电磁场与主电路电流回路, 故具有良好电气绝缘性能。现在国内外已制造出 0.2 级的 Rogowski 绕组。

现场试用表明, Rogowski 光电式电流互感器具有结构简单、安装方便、测量范围宽、精确度高 (优于 ±0.5%)、抗干扰能力强、运行稳定可靠、易以数字输出和性能价格比高等特点。

2.1.2 法拉第磁光效应电流互感器

所谓法拉第磁光效应^[5], 如图 1 所示就是当一束平面线偏振光通过置于磁场中的磁光材料时候, 其偏振面发生旋转的现象, 其偏振面偏转角为

$$\Delta\phi = VHL = V \int_L H dl = VNI \quad (1)$$

其中: V 是费尔德常数 (rad/A), H 是磁场强度 (A/m), L 是光在磁光材料中通过的长度 (m), N 为绕载光的载流导线圈数。

只要确定偏转角的大小, 就可以测出载流导线的电流。而实际测量中将偏转角通过检偏器转化为光强信号, 再由探测器将光信号变为电信号, 经过放大处理, 最终得出待测电流信息。

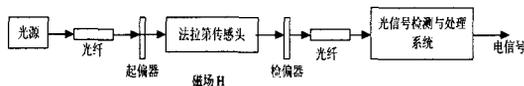


图 1 法拉第效应原理图

Fig.1 Schematic diagram of Faraday effect

2.1.3 光学电压互感器

光学电压互感器的测量原理大致可分为基于 Pokels 效应和基于逆压电效应或电致伸缩效应^[6]两

种, 现在研究的光学电压互感器大多是基于 Pokels 效应的 (包括集成光学电压互感器^[7])。Pokels 效应就是某些晶体在外加电场作用下, 其折射率发生相应的变化。这些微小的变化将产生明显的光学效应, 可以借助双折射效应和干涉的方法精确地测量出来。电光晶体种类较多, 其中 BGO (Bi4Ge3O12) 晶体理论上无热释电性、无旋光性、无自然双折射, 且稳定性好, 是目前电光传感器中用得最多的一种电光晶体^[8], 但也有很多用不同电光晶体做成的电压传感器^[9]。一束线形偏振光照射到 BGO 表面时, 分裂成振动方向相互垂直的两束光, 其相位差与所加电压成正比。结构和材料不同, 相位差的大小也不同。图 2 所示为光学电压互感器原理图。



图 2 光学电压互感器原理图

Fig.2 Schematic diagram of optical voltage transformer

相位差 δ 可用下式计算:

$$\delta = \frac{2\Pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} U, U = U_0 \sin \omega t \quad (2)$$

式中: λ 为入射光波波长; n_0 为 BGO 晶体的折射率; γ_{41} 为 BGO 晶体线形电光系数; U 为被测电压; U_0, ω 分别是电压幅值和角频率。

通常利用偏光干涉的方法将 δ 转变为输出光强的变化来检测它, 利用 1/4 波片使两束光的相位差增加 90° , 总的相位差为 $\delta + \Pi/2$ 。

出射光强 I 可以表示为

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta + \Pi/2}{2}\right) = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + \sin\left(\Pi \frac{U_0}{U_\Pi} \sin \omega t\right)\right] \quad (3)$$

式中: I_0 是入射光强; $U_\Pi = \lambda / (2n_0^3 \gamma_{41})$ 称为半波电压。

由此可见, 利用出射光强和电压的关系, 只要通过光电变换和信号处理就能测量被测电压^[10]。

2.2 电能表

2.2.1 单相电子式复费率电能表

单相电子式复费率电表一般具有以下功能:

① 红外通讯, 通过红外接口和抄表手机进行通讯, 可抄写电量、时段、时间等数据。

② 运用电能计量模块实行计量功能, 实现有功、无功计量。

③ 能实现分时处理,两费率(峰和谷)多时段电能计量能力。

④ 存贮功能,可以存贮本月、上月的总电量,峰谷电量数据。

⑤ 具有完整的显示功能,包括时段显示。在峰时段运行时“峰费率”指示灯亮,在谷时段运行时“谷费率”指示灯亮,液晶屏可顺序显示当前电量(总电量和谷电量),当前时间、表号、时段数据,主要上月电量(上月总电量和谷电量)^[11]。

2.2.2 三相预付费电表

三相预付费电表是指由电能计量单元、购电控制器、报警单元和分合断路器(能够自动或半自动控制供电回路)等组成,使用户必须先付费后用电的电能计量装置。三相预付费电表自投入使用后,没有发生偷漏电和欠费现象,避免了抄表人员漏抄、估抄现象,提高了售电用电的透明度^[12]。

2.2.3 数字式电能表

数字式电能表的电量输入采用了数字输入接口模式。数字输入接口严格遵循了当前国际流行的 IEC61850 标准,在物理层和链路层上采用了 IEC61850 推荐的高速光纤以太网,具有传输数据快,抗干扰能力强,接线简洁等特点,实现了和数字式光电互感器真正意义上的无缝连接。数字式电能表获取已数字化的电流电压瞬时值后,计算得到所需的电量值。由于数字计算过程理论上不会产生任何误差(实际可能产生的误差为浮点数运算时有效位误差,为数字信号处理器固有误差,与数字式电能表无关,这种误差小于万分之一),即数字式电能表的准确度由数字式互感器决定,其不规定精度等级。

3 现代电能计量系统的发展趋势

21 世纪将是信息网络化、高新科技成果被广泛应用和电力企业持续发展的时代。数字化、智能化、标准化、系统化和网络化是现代电能计量系统发展的必然趋势。

(1) 数字化。所谓数字化就是采用数字式计量芯片,应用高新技术成果研制电子式电能计量系统。电能计量系统实现数字化,能够不断提高计量系统性能,进一步保证计量结果的准确性和可靠性。

(2) 智能化。所谓智能化就是采用高新技术不断完善多功能电能表标准 DL/T614—1997 规定的所有功能,同时,开发研制具有自校准组合互感器、电能计量综合误差自动跟踪补偿等特殊功能的全新电能计量系统。电能计量系统实现智能化,能够进一步推进我国电价制的变革,满足运营管理的需要,

解决特殊负载用户的计量问题,开展现场实负载整体检验电能计量系统。

(3) 标准化。所谓标准化就是依据电能计量系统技术管理规程 DL/T448—2000 中的电能计量系统配置原则,分别对发电运营侧、电网运营侧和供电运营侧配置相应的电能计量系统。电能计量系统实现标准化,能够进一步优化电能计量系统的配置,使其达到先进、合理、统一的要求,以便于运行、维护与管理。

(4) 系统化。所谓系统化就是将电能计量系统与自动抄表系统联通组成一个电能计量管理系统。电能计量系统运行实现系统化,能够不断改善工作条件与服务质量,从而进一步提高工作效率和经济效益。

(5) 网络化。所谓网络化就是将电能计量装置管理系统联通构成一个电能计量信息网络。电能计量系统实现网络化,能够不断拓宽信息资源,达到充分共享,从而进一步提高运营管理水平和服务质量。电能计量信息网路应按照可能性和必要性分别建立地域网和区域网等。

4 结束语

文中回顾了电能计量系统的发展历程,介绍了几种特殊功用的新型互感器和电能表,以及电能计量芯片,展望了 21 世纪现代电能计量系统的发展趋势,以供读者参考并引起大家参与讨论。

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.
LI Lai-wei,LI Shu-quan,SUN Xiao-li. Power Metering Device Facing 21st Century—Discussion on Development and Prospect for Power Metering Device[J]. Electrical Equipment, 2004, (4):1-4.
- [2] 狐晓宇.光电互感器与电磁互感器的比较[J].电力学报,2005,(3):295-296.
HU Xiao-yu. The Comparison of Photovoltaic Transformer and Electromagnetic Transformer[J]. Journal of Electric Power,2005,(3):295-296.
- [3] 刘威.基于 DSP 的高精度复费率电能表的设计(硕士学位论文)[D].沈阳:东北农业大学,2006.
LIU Wei. The Design of High Precision Multi-Rate Watt-Hour Meter Based on DSP, Thesis[D]. Shenyang: Northeast Agricultural University, 2006.
- [4] 余春雨,李红斌,叶国雄,等.电子式互感器数字输出特性与通讯技术[J].高电压技术,2003,(6):7-8,11.
YU Chun-yu,LI Hong-bin,YE Guo-xiong,et al. Communication Technique of Electrical Instrument Transducers with Digital Output[J]. High Voltage

Engineering, 2003, (6):7-8,11.

[5] Cruz J L, Diez A, Andres M V, et al. Fiber Bragg Gratings Tuned and Chirped Using Magnetic Fields[J]. Electron Lett, 1997;33(3):235-236.

[6] Fabiny L, Vohra S T, Bucholtz F. High-resolution Fiber-optic Low-frequency Voltage Sensor Based on the Electrostrictive Effect[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993,5(8):952-953.

[7] IEE Sang-shin, AHN Seh-won, OH Min-cheol, et al. Integrated Optical High-voltage Sensor Based on a Polymeric Y-branch Digital Optical Switch[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996,8(7):921-923.

[8] 罗苏南, 叶妙元, 徐雁. 光纤电压互感器稳定性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (12): 15-19.

LUO Su-nan, YE Miao-yuan, XU Yan. Stability Research on Optical Fiber Voltage Transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (12): 15-19.

[9] Cruden A, Richardson Z J, McDonald J R, et al. Compact 132 kV Combined Optical Voltage and Current Measurement System[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1998,47(1):219-223.

[10] 程云国, 刘会金, 李云霞, 等. 光学电压互感器的基本原理与研究现状[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (5): 87-90.

CHENG Yun-guo, LIU Hui-jin, LI Yun-xia, et al. Basic

Principle and Current Development of Optical Voltage Transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (5): 87-90.

[11] 聂国星. 浅谈电子式复费率电表设计[J]. 江西煤炭科技, 2004, (2): 50-51.

NIE Guo-xing. Notes on Design of Time-sharing Electricity Meter[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2004, (2): 50-51.

[12] 杨莉. 浅析预付费电能表的应用[J]. 云南电力技术, 2006, 34 (6): 69-70.

YANG Li. Shallow the Applying of Prepaid Electric Energy Meter[J]. Yunnan Electric Power, 2006, 34 (6): 69-70.

收稿日期: 2008-06-29

作者简介:

李静(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、控制与分析; E-mail: jing20052006@yahoo.com.cn

杨以涵(1927-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制、人工智能在电力系统中应用等;

于文斌(1976-), 男, 博士后, 研究方向为光电测量技术及其在电力系统中的应用。

(上接第 129 页 continued from page 129)

XU La-yuan. Summarization of Domestic Distribution Automation[J]. Rural Electrification, 2004, (3): 5-6.

[2] 李金安, 崔爱国. 城市配网综合自动化应用技术初探[J]. 现代电力, 2001,18(1):41-42.

LI Jin-an, CUI Ai-guo. To Probe into City Integrated Automation Technology of Distribution Network and Its Application[J]. Journal of Shandong College of Electric Power, 2001,18(1):41-42.

[3] Markushevich N. Voltage and VAR Control in Automated Distribution Systems[J]. International Symposium on DA/DSM, 1993,(3): 478-485.

[4] 蔡运清. 北美的配电自动化[J]. 中国电力, 1998,31(8): 58-59.

CAI Yun-qing. Distribution Automation in North America[J]. Electric Power, 1998,31(8):58-59.

[5] 孙晓韡, 姜秋海. 对德国配电网的考察[J]. 供用电, 2006,23(3): 74-76.

SUN Xiao-hua, JIANG Qiu-hai. To Inspect Distribution Network in Germany[J]. Distribution & Utilization, 2006,23(3): 74-76.

[6] 范明天, 苗竹梅, 王敏. 赴意大利、法国考察供电技术管理的报告[J]. 电力设备, 2004,5(6): 72-75.

FAN Ming-tian, MIAO Zhu-mei, WANG Min. Report on Inspection of Distribution Technology Management in Italy and France[J]. Electrical Equipment, 2004,5(6): 72-75.

[7] 刘恩德. 日本关西电力公司的高级配电自动化系统[J].

国际电力, 2003,7(1):33-35.

LIU En-de. An Advanced Distribution Automation System in Kansai Electric Power Company[J]. International Electric Power, 2003,7(1):33-35.

[8] 袁明军. 韩国的配网自动化系统[J]. 山东电力技术, 2003,(3): 80-82.

YUAN Ming-jun. Distribution Automation System in Korea[J]. Shandong Electric Power Technology, 2003,(3): 80-82.

[9] Hoffman R, Aouad P. Communications for a Large Distribution Automation Project in Thailand[A]. In: Power Engineering Society General Meeting IEEE[C]. 2004. 1446-1451.

[10] Krishna Rao M V, Reuven Peri Kay, Clinard N, et al. Development and Evaluation of a Distribution Automation System for an Indian Utility[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,10(1): 452-456.

收稿日期: 2008-07-14; 修回日期: 2008-08-12

作者简介:

王海燕(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统防雷技术研究; E-mail: wanghaiyan09@126.com

曾江(1972-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电能质量、配网自动化;

刘刚(1969-), 男, 博士、副教授, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、过电压及其防护、输变电外绝缘特性。