

电子式互感器评述

郭志忠

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 概述了互感器传感准确化、传输光纤化和输出数字化的基本发展趋势。以 IEC 标准为基础, 讨论了电子式互感器的结构体系和电子式互感器与数字变电站的关系。评述了电子式互感器的各种实用化的传感方法。介绍了 POSS-OCT 光学电流互感器实用化的基本情况。

关键词: 电子式互感器; 光学电流互感器; IEC 标准; 数字变电站

Review of electronic instrument transformers

GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Instrument transformers used in electrical power systems are developing to the directions of higher accuracy, optical fiber transporting and digital output. Based on the IEC standards, some concepts of electronic instrument transformers are discussed including their structures and the logical relationship with digital substations. The main sensing methods of electronic voltage transformer (EVT) and electronic current transformer (ECT) are reviewed from pragmatic points. POSS-OCT, a kind of optical current transformer produced by Beijing Xuji Power Optic Technology Co., is introduced for its static performance, transient performance and its application in substations.

Key words: electronic instrument transformers; optical current transformer; IEC standards; digital substations

中图分类号: TM45; TM76 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0001-05

1 互感器的发展趋势

作为电力系统保护控制、调度运行和经营管理的基础电力装备, 互感器的主流发展趋势是传感准确化、传输光纤化和输出数字化。

传感准确化首当其冲。现代电力系统要求互感器的测量精度满足电能计量、电能质量监测、保护控制、故障录波以及电网动态观测等各种应用装备和系统现实的不断发展的需求。

为了提高电网的运行安全性, 近年来相量测量单元(PMU)和基于 PMU 的广域测量系统(WAMS)得到了普遍的重视^[1]。部署了 PMU/WAMS 后, 电网就动态可观测了吗? 答案是否定的。PMU 并不具备测量能力, 只是数据采集装置, 其前端是互感器。互感器不准确, PMU/WAMS 采集的电网动态数据就不准确。电网的动态可观测, 要求高采样密度和时间同步的 PMU/WAMS, 还需要暂态测量准确的互感器。故障录波器对测量的需求也是如此。

保护与控制装置的正确动作依赖准确的测量。

传统互感器的故障测量往往不准确, 迫使保护装置附加了若干额外判据。尽管如此, 不正确动作的情况仍然时有发生。

实际运行的保护控制装置主要利用基波测量。事实上, 全波形或任何分量的波形, 都可以不同程度地反映故障。主要利用基波, 是因为传统互感器不具备准确感知非周期分量和全波形的能力。暂态波形或全波形为测量基础的保护原理和方法, 由于没有准确暂态测量的支撑, 只能停留在概念和理论阶段。

现代电力系统正在走向数字化, 作为数字电力系统的重要组成部分, 数字变电站需要数字输出的互感器, 需要光纤传输方式的互感器。

传感准确化、传输光纤化和输出数字化的互感器主流趋势必然导致了电子式互感器的诞生。

依附于上述的主流发展趋势, 电子式互感器还要考虑若干其他的需求因素。比如, 简化绝缘结构提高绝缘安全性, 降低制造成本, 减小体积和减轻重量, 便于安装和检修维护, 电流与电压测量一体

化, 嵌入到 GIS 产品等等。

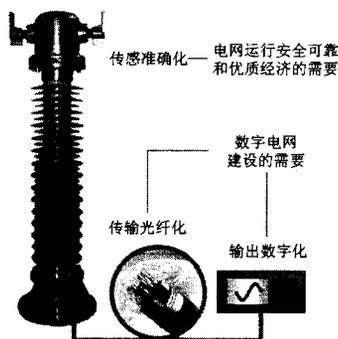


图 1 互感器的发展趋势

Fig.1 The trend of instrument transformer development

2 电子式互感器

电子式互感器不具备负载能力, 这是与传统互感器的本质区别。电子式互感器的输出或者是小电压之模拟量, 或者是数字量。这样的互感器一定有电子部件, 电子式互感器由此得名。

国际电工委员会 (IEC) 制订了电子式互感器的两个标准: 电子式电压互感器 (EVT) 的 IEC60044-7^[2] 和电子式电流互感器 (ECT) 的 IEC60044-8^[3]。略做修改后, 中国标准化管理委员会颁布了基于 IEC 标准的电子式互感器国家标准, 分别是关于 EVT 和 ECT 的 GB/T 20840.7-2007 和 GB/T 20840.8-2007^[4,5]。

数字变电站需要数字输出的电子式互感器。IEC 标准保留电压模拟量输出形式的目的是为了与传统的电能计量系统或者保护装备对接, 是过渡性考虑。

IEC 标准没有限定传输系统的形式, 传输介质可以是光缆也可以电缆。在数字变电站体系中, 光纤方式最理想。

电子式互感器可以采用不同的传感方法, 因此 IEC 标准不限定传感方法。

IEC 标准定义了电子式互感器的通用结构, 包括三部分: 一次部分、二次部分和传输系统。在图 2 中, P1、P2 是一次输入端, S1、S2 是电压模拟量的二次输出端, 数字输出与间隔层的合并单元对接。

电子式互感器, 传感方法有光学原理的和电磁测量原理 (含分压方式的电压测量方法, 以下同) 两大类。对于不同的传感方法和传输系统之组合, 通用结构一次部分的有些环节可以缺省。

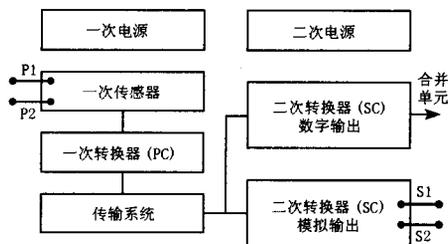


图 2 电子式互感器的通用结构

Fig.2 General structure of electronic instrument transformers

假设采用光纤传输方式。若一次传感器是电磁测量原理的, 一次转换器 (PC) 就要将一次传感器的电输出信号转换为光信号, 再由光纤传输系统送出去。一次转换器是电子部件, 需要一次电源供电, 此类互感器叫有源电子式互感器。若一次传感器是光学原理的, 光纤传输系统可以直接将光测量信号送出去, 就不需要一次转换器 (PC), 也就无需一次电源了, 此类互感器叫无源电子式互感器。很明显, 无源电子式互感器具有更简单的结构体系。

与传感方法和传输方式无关, 任何电子式互感器的二次部分都遵守图 2 的结构。二次部分有两个二次转换器, 分别输出电压模拟量和数字量; 在光纤传输方式下, 二次转换器还承担光电转换的功能。二次转换器是电子部件, 自然需要二次电源。

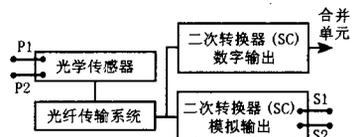


图 3 光学传感原理的电子式互感器的结构

Fig.3 Structure of electronic instrument transformers based on optical sensing methods

与传统的电能计量系统比较, 基于数字输出的电子式互感器的电能计量系统精度更高。假设电压互感器和电流互感器均为 0.2 级。数字传输的电子式互感器没有附加传输误差, 数字电能表也没有附加误差, 因此电能计量系统的精度为 0.4%。传统的电能计量系统, 模拟量传输存在 0.1% 的附加误差, 对应的模拟量输入的电能表存在 0.2% 的误差, 因此计量精度为 0.7%。注意, 这种精度的提高完全是数字化产生的效益。

3 电子式互感器与数字变电站

按照 IEC61850 标准^[6,7], 数字变电站具有三层结构: 一次电力装备的过程层、间隔层和属于变电站整体的站控层。这里不讨论数字变电站, 只谈电子式互感器与数字变电站的关系。

图 4 是电子式互感器在数字变电站中的逻辑位置。处于过程层的 EVT 和 ECT 向间隔层的合并单元 (MU) 提供电压和电流测量数据, MU 将测量数据提供给保护控制装置并上传到站控层。

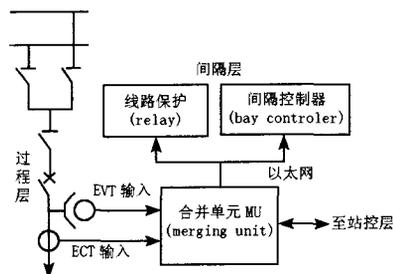


图 4 数字变电站中的电子式互感器

Fig.4 Electronic instrument transformers substations based on IEC 61850 standards

按照 IEC 标准, 在数字变电站中, 每个间隔拥有 7 路电流测量和 5 路电压测量。图 5 是每个间隔中 EVT 和 ECT 的配置情况。

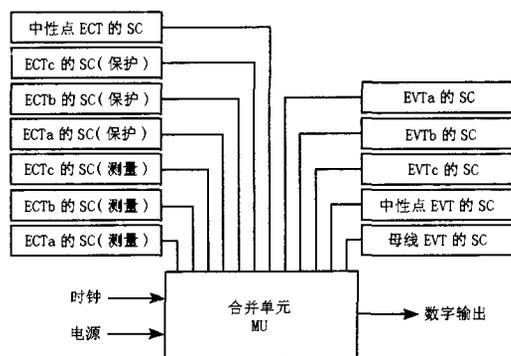


图 5 电子式互感器与合并单元的连接

Fig.5 Electronic instrument transformers and merging unit

IEC 标准明确了 MU 的输出格式, 却没有规定电子式互感器与 MU 的接口。如此, 倘若 MU 由变电站自动化系统制造商提供, 就存在电子式互感器与 MU 的接口标准问题; 倘若 MU 由电子式互感器制造商提供, 这个接口则是电子式互感器制造商自己的事情, 统一接口标准的问题就不存在了。

没有规定电子式互感器与 MU 的接口格式, 大概是 IEC 标准的制订者认为 MU 应该由电子式互感器制造商提供。其实这样做也有问题。如果电子式互感器不是一个厂家的产品, 接口标准的问题仍然存在。

电子式互感器是数字变电站的关键装备, 但传统的变电站自动化系统与电子式互感器组合起来绝不等于数字变电站, 如果非说是, 也只是“伪”数字变电站。数字变电站的变化是革命性的, 电子式

互感器仅是这种革命性变化的一个部分。建设完备的数字变电站的关键是 IEC 标准, 不仅要认真研读和理解, 而且要在数字变电站的设计与实施过程中忠实地恪守。

4 传感方法

一方面, 特定之传感方法, 包括传感原理、传感材料和传感结构, 都可以构成特定类型的电子式互感器。另一方面, 传感方法本质地决定了与之对应的电子式互感器的测量品质、结构体系、运行安全性和制造成本。

● EVT 的传感方法

Faraday 电磁感应原理和电容分压方式的电压互感器是目前的主流产品, 属于电磁测量原理。

从测量品质角度看, 两种电压互感器的稳态精度都满足电能计量的要求, 故障测量也没有电磁式电流互感器那样的磁路饱和现象。但是电磁式电压互感器存在测量频带问题, 不能准确测量非周期分量; 电容分压的电压互感器存在暂态测量的时间延迟问题。这些问题对故障测量的准确度产生了不利影响。

从运行安全性角度看, 电磁式电压互感器存在铁磁谐振引发的设备故障隐患。

从绝缘角度看, 无论是电磁感应方式还是电容分压方式, 测量的都是母线对地的电压, 因此传感方法不可能明显改变绝缘结构和大幅度降低绝缘成本。

从体系结构角度看, 以电磁感应原理和电容分压方式为基础的 EVT 都是有源 EVT。

除了上述两种电压互感器之外, 基于 Pockels 电光效应的光学电压互感器 (OVT) 测量品质优良, 不存在运行安全性问题, 长期受到世界电力系统界的关注。由于存在测量精度的温度漂移问题和运行可靠性问题, 目前还达不到工业化应用的程度。

● ECT 的传感方法

基于 Faraday 电磁感应原理的电磁式电流互感器是目前的主流产品。Faraday 电磁感应原理感知变化电流, 如此产生测量频带问题: 频率很低的电流分量测量不准确, 不具备测量非周期分量的能力, 更不能测量稳恒直流了。由于采用了铁心线圈, 故障测量有磁路饱和现象, 严重影响了测量精度。以电磁式电流互感器为基础的 ECT 叫铁心线圈低功率电流互感器 (LPCT), 高导磁材料以及小电压信号输出方式可以减轻磁路饱和现象, 但不能根除。

与 LPCT 完全一样, 罗可夫斯基线圈电流互感器 (RCT) 也基于 Faraday 电磁感应原理, 不同的

是用非磁性材料的空心线圈取代了铁心线圈，彻底解决了磁路饱和问题，使故障情况下正弦电流分量的传感精度有了根本保证。同样由于传感原理的原因，RCT 也存在测量频带问题。

Faraday 磁旋光效应为传感原理的电流互感器叫光学电流互感器 (OCT)。Faraday 磁旋光效应陈述了这样的一个事实：线性偏振光通过置放在磁场中的 Faraday 材料后，偏振光的振动角度将发生正比磁场平行分量的偏转。OCT 通过感知磁场而感知电流，与电流的变化无关，因此在原理上 OCT 没有测量频带问题。由于是光学传感原理，也没有磁路饱和问题。

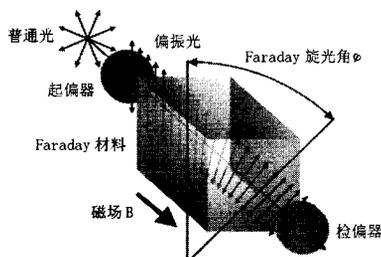


图 6 Faraday 磁旋光效应

Fig.6 Faraday magnetic optic effect

据此得到结论：在测量品质上 OCT 最好，RCT 次之，LPCT 最差。

与 EVT 不同，光纤传输方式可以使各种 ECT 的绝缘结构大幅度地简化，不仅保证了绝缘安全性，而且也可以明显降低绝缘费用。

5 光学互感器的实用化进展

电子式互感器中，光学互感器品质最优良，但实用化的技术难度也最大。光学互感器长期没有实用化的原因是存在两个世界难问题：1、测量精度受环境温度的影响问题；2、存在长期运行的可靠性问题。

40 多年以来，出现过大量光学互感器的研究论文，出现过许多挂网运行的报道^[8]。长期和持续的研究工作大幅度推进了光学互感器的实用化程度。但是，由于技术难度不能有效解决，绝大部分研究单位先后退出了研究行列。

实践是检验真理的唯一标准，只有如下两个事实同时存在才能佐证 OCT 的实用化，而不是研究论文和制造商自己的宣称：1、是否根据 IEC 标准通过了权威检测机构严格的质量检测；2、是否有长期挂网之可靠运行经历。

相比而言，电力系统对 OCT 的需求比 OPT 更迫切，主要原因如下：

- 故障情况下传统互感器的测量都有程度不同的失真，但电流互感器远比电压互感器严重。OCT 良好的故障测量精度具有更大的吸引力。
- 光学互感器自然要采用光纤传输，而光纤传输方式于电流互感器可以大幅度简化绝缘结构和降低制造成本，于电压互感器却达不到此种效果。
- 电力系统电流互感器的数量远多于电压互感器，市场规模更大。

经过多年努力，美国 NxtPhase 公司开发的 OCT 和 OPT 产品已在若干变电站投入了运行，他们的报道表明运行情况良好^[9]。该公司曾到我国推介光学互感器产品，国网公司有关部门建议他们在中国进行质量检测，不知什么原因，他们没有这样做。

历时十八年，北京许继电力光学技术有限公司取得了突破性进展。开发的 35kV、110 kV、220 kV 和 500 kV 的 POSS-OCT 光学电流互感器系列产品已于 2008 年 2 月在武汉高压研究院都通过了产品试验。在 (60℃, -40℃) 的温度范围内，POSS-OCT 的稳态精度为 0.2s 级，20 倍额定电流的测量误差小于 ±1%，达到和超过了 TPE5 指标。绝缘、拉伸和电磁兼容等全部指标都满足 IEC60044-8 标准。图 7 是 POSS-OCT 光学电流互感器的循环温度试验结果。

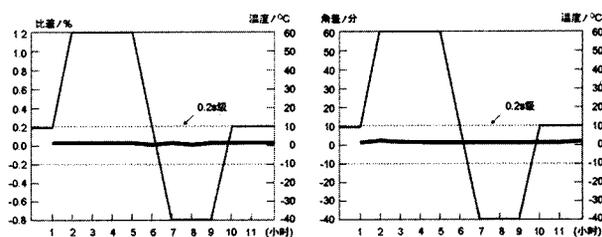


图 7 POSS-OCT 光学电流互感器的循环温度试验

Fig.7 Periodic temperature test of POSS-OCT

OCT 暂态电流测量准确。试验表明，POSS-OCT 光学电流互感器测量非周期分量最大瞬时值的误差小于 ±1%，相比于暂态电流互感器 ±10% 的标准要求，提高了整整一个数量级。

图 8 是在太行山区 35kV 变电站运行的 POSS-OCT 光学电流互感器的故障电流测量结果。图中，实线是 POSS-OCT 的测量曲线，虚线是传统电磁式互感器的测量曲线。POSS-OCT 的测量明显地包含了非周期分量。

静态工作光强是 OCT 的关键可靠性指标。图 9 是 POSS-OCT 光学电流互感器在河北 110kV 电网运行 25 个月的静态工作光强曲线，该曲线稳定在

理想的范围内,表明 POSS-OCT 具有良好的运行可靠性。

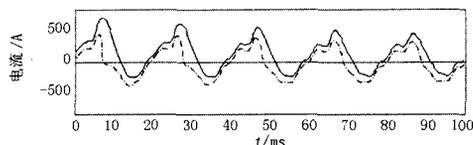


图 8 故障电流的测量

Fig.8 A fault current curve measured by POSS-OCT

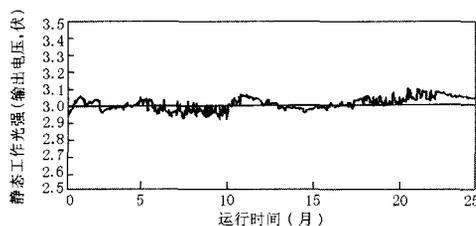


图 9 POSS-OCT 光学电流互感器的静态工作光强曲线
Fig.9 Curve of static state operating light intensity of POSS-OCT

已有 10 台 POSS-OCT 光学电流互感器投入了电网运行。图 10 是 2007 年 11 月开始在黑龙江省黑河市 110kV 变电站运行的 POSS-OCT。黑河是中国最寒冷的地区之一,挂网运行是为了有效验证 POSS-OCT 的环境温度适应能力。

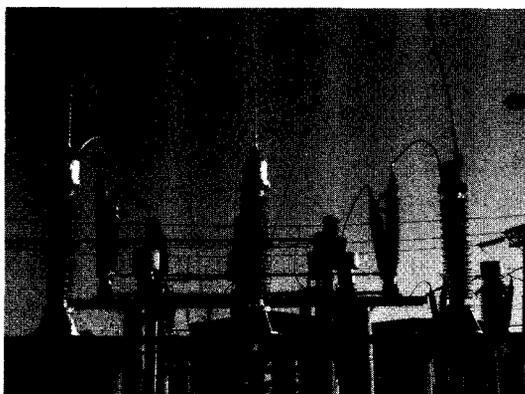


图 10 运行在黑河市 110kV 电网的 POSS-OCT

Fig.10 POSS-OCTs in a substation of Heilongjiang power grid

6 结论

电子式互感器的诞生是互感器传感准确化、传输光纤化和输出数字化发展趋势的必然结果。电子式互感器是数字变电站的关键装备之一。传感方法对电子式互感器的结构体系有很大影响。光学原理的电子式互感器结构体系简单,是无源的电子式互感器。电磁测量原理的电子式互感器必然是有源电子式互感器。基于数字输出形式的电子式互感器的

电能计量系统具有明显的精度优势。

电磁测量原理的电子式互感器沿袭相同原理的非电子式互感器的测量品质。光学原理的电子式互感器没有测量频带问题,光学电压互感器没有铁磁谐振问题,光学电流互感器没有磁路饱和问题。在电子式互感器中,光学互感器的测量品质最好。

从实际应用角度看,光学电流互感器的需求比光学电压互感器更迫切。

具有自主知识产权的 POSS-OCT 型光学电流互感器已经通过了武汉高压研究院的产品检测,技术指标满足 IEC 标准,具有理想的稳态和暂态测量精度。三年多的挂网运行数据表明,POSS-OCT 光学电流互感器具有良好的运行可靠性。

参考文献

- [1] 郭志忠.电网自愈控制方案[J].电力系统自动化, 2005, 29(10): 85-91.
GUO Zhi-zhong. Scheme of Self-healing Control Frame of Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 85-91.
- [2] IEC60044-7, Instrument Transformers-Part7: Electronic Current Transformers[S]. 2002.
- [3] IEC60044-8, Instrument Transformers-Part8: Electronic Current Transformers[S]. 2002.
- [4] 国家标准 互感器第 7 部分:电子式电压互感器[M].北京: 中国标准出版社,2007.
- [5] 国家标准 互感器第 8 部分:电子式电流互感器[M]. 北京: 中国标准出版社,2007.
- [6] IEC61850-9-1, Communication Networks and Systems in Substations, Part9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM)-Sampled Analogue Values Over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].
- [7] IEC61850-9-2, Communication Networks and Systems in Substations, Part9-2: Specific Communication Service Mapping(SCSM)-For Process Bus[S].
- [8] Karady G G, Kucuksari S, Ma Y. Performance Assessment of Advanced Digital Measurement and Protection Systems, Final Report for PSERC Project T-22, Part I[R].Arizona State University, 2006.
- [9] www.nxtphase.com[EB/OL].

收稿日期: 2008-06-24; 修回日期: 2008-07-08

作者简介:

郭志忠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 当前主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统光学测量技术、电网络分析。E-mail:zhizhongg@bjxj-xjgc.com