

电子式高压电力互感器的发展现状及在电力系统中的应用

张建超¹, 刘晓波¹, 张 飞², 闫璐明³, 郭继芳⁴, 郭小燕⁵

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 长沙电力职业技术学院电力工程系, 湖南 长沙 410131;
3. 郑州供电公司, 河南 郑州 450052; 4. 北京电力公司平谷供电公司, 北京 101200;
5. 河北省电力公司石家庄培训中心, 河北 石家庄 050031)

摘要: 随着电力系统朝着自动化、智能化和数字化方向的发展,传统的电磁式电流互感器因自身传感机理限制很难满足电力系统发展要求。电子式高压电力互感器取代传统的电磁式互感器已成为发展的必然趋势。笔者论述了电子式高压电力互感器的研究意义,介绍了电子式高压电力互感器的类型及发展历史和研究现状,归纳提出了混合电子式高压电力互感器的实用化问题。

关键词: 互感器;电子式互感器;数字化变电站;光学电流互感器;应用

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0106-05

Development of High-voltage Electronic Transducers and Their Application in Power System

ZHANG Jian-chao¹, LIU Xiao-bo¹, ZHANG Fei², YAN Lu-ming³, GUO Ji-fang⁴, GUO Xiao-yan⁵

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. Department of Electrical Engineering, Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, China; 3. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450052, China; 4. Beijing Pinggu Electric Power Company, Beijing 101200, China; 5. Shijiazhuang Training Center of Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: With the development of electric power system towards automatization, intelligence and digitalization, conventional current transformers cannot meet the requirement of modern electric power systems due to their limit in sensing mechanism. Therefore, substitution of high-voltage electronic transducers for conventional transformers is a trend. This paper discusses the significance of the research on high-voltage electronic transducers, introduces different types of the transducers and their development, and concludes some issues in application of mixed high-voltage electronic transducers.

Key words: transducer; electronic transducer; digital substation; optical current transformer; application

0 引言

互感器是为电力系统进行电能计量、测量、控制、保护等提供电流电压信号的重要设备,其精度及可靠性与电力系统的安全、稳定和经济运行密切相关,是电力系统必不可少的设备。随着电力工业的发展,电力系统传输容量不断增大,电网运行电压等级越来越高。目前,我国运行的最高电压等级是750 kV, 1 000 kV的交流输电线路和±800 kV的直流输电线路正在计划中。建造数字化变电站已成为变电站自动化技术的发展趋势。

1 电子式高压电力互感器研究的意义

1.1 传统互感器的缺点

高电压、大电流的测量对于电力系统安全、经济

地运行具有重要的意义。准确地测量各种电压、电流值是电能测量、继电保护、系统监测诊断以及电力系统分析的前提条件^[1]。电力互感器,包括电压互感器和电流互感器,是电力系统中进行电能计量和获取继电保护信号的重要设备。随着电力系统的发展,发电和输变电容量不断增加,电网电压不断提高,对电流和电压互感器提出了许多新的和更加严格的要求^[2],而传统的电磁式电力互感器已越来越不适应这种发展情况,在运行中暴露出一系列严重缺点:①绝缘结构复杂,体积笨重,造价高,特别是用于超高压系统并且要满足大短路容量的动稳定及热稳定要求时;②传统互感器测量稳态电流时,线性度是很好的,但是由于线路中暂态时存在直流电流,使得电流互感器易发生饱和,造成测量误差;③电压互感器可能出现铁磁谐振,损坏设备;④由电流、电压互感器引至二次保护控制设备的电缆是电磁干扰的重要耦合途径;⑤采用油浸纸绝缘易燃、易爆不安全;⑥电磁式

收稿日期:2008-10-09; 修回日期:2008-12-17

基金项目:贵州省创新基金项目资助(省研理工 2009002)。

作者简介:张建超(1983),男,硕士研究生,主要从事高电压技术及电力系统运行方面的研究。

电流互感器的二次侧输出对负荷要求很严格,若二次负载较大,测量误差就增大,准确度下降。

1.2 新型互感器的开发和应用的原因

各种类型基于不同测量原理的新型互感器应运而生^[3],但经过了三十多年的发展,直到近几年才取得重大进展,促进了新型互感器的开发和应用^[4],其原因如下:①微电子技术广泛用于测量和保护等,二次设备功率消耗很小,一般不超过 $1\sim 2\text{ V}\cdot\text{A}$ 甚至为毫伏安级,对互感器的输出容量要求大大降低,但二次设备的低电平对抗电磁干扰提出了严峻要求;②开关设备的集成化和智能化要求互感器体积小、重量轻,输出实现数字化;③发电厂和变电站综合自动化的广泛应用,要求互感器输出数字化,甚至直接接入过程总线实现网络化;④数字技术和光通信技术的快速发展,使互感器输出信号可方便地变成数字信号,通过光纤输出,彻底解决高压设备的绝缘问题和电磁干扰问题。

1.3 电子互感器的优点

鉴于光电互感器以及其他新型互感器的快速发展,国际电工委员会(IEC)制定了电子式电压互感器标准 IEC 60044-7、电子式电流互感器标准 IEC 60044-8。按照此标准,电子式互感器的含义包括所有的光电互感器及其他使用电子设备的互感器。根据 IEC 标准^[5],新型互感器被统称为电子式互感器,它与传统电力互感器相比,具有以下优点:①绝缘结构简单、体积小、重量轻,因无铁心、无绝缘油等,一般电子式互感器的重量只有电磁式互感器重量的 $1/10$,便于运输和安装;②不存在磁饱和与铁磁谐振问题,能在很大的电流与电压变化范围内,以高速动作、准确、抗干扰的宽频带性能来测量电流、电压;③由于传感和信号处理部分外形小和重量轻,可以装入成套电器或成套配电装置中,能适应电力设备向集成化方向发展的趋势;④采用光纤或其他加强绝缘方式实现高电压回路与二次低压回路在电气上的完全隔离,消除这些回路不希望有的相互影响,保护了二次设备和工作人员的安全;⑤适应了继电保护装置(包括微机保护)的发展。由于受传统互感器性能的限制,其保护原理基本上是基于工频量进行保护判断的,易受过渡电阻和系统振荡、磁饱和等因素影响,其保护性能难以满足当今电力系统向着超高压、大容量、远距离方向的发展要求。而利用故障时的暂态信号量作为保护判断,是微机保护的发展方向,它对互感器的线性度、动态特性等都有较高的要求,电子式互感器的出现满足了这一要求;⑥有利于实现变电站数字化、光纤化和智能化。电子式互感器的信号和传输形式都可以采用光缆(光纤)实现,而光信号的突出优点和光纤通信技术的广泛采用使得变电站内部以及和上级站之间的数据传输更

加可靠和迅速。在电力系统电子式互感器与光纤通讯技术和微机相结合组成光纤局域网是变电站自动化的一个重要发展方向,开创了未来光纤化变电站的美好前景。

2 电子式高压电力互感器的类别

电子式高压电力互感器有两个主要类别:光学电子式互感器和混合电子式互感器。

2.1 光学电子式互感器

光学电子式互感器的电流测量原理包括 Faraday 效应、磁致伸缩效应、Kerr 效应和逆压磁效应等,电压测量原理包括 Pockels 效应、Kerr 效应和逆压电效应等。其中利用 Faraday 效应测量电流和 Pockels 效应测量电压的方法最直接,装置最简单、精度高,所以应用范围最广、研究力度最大^[6]。

20 世纪 60 年代,人们就开始了光学电子式互感器的探索,由于当时光导纤维尚未出现,光通路中的光强波动厉害,测量的稳定性很差^[7]。70 年代,随着光导纤维的出现,光纤传感技术在高压电力系统中的应用研究出现热潮^[8],但样机精度低、温度稳定性差,皆未挂网运行。80 年代后期以来,光电传感技术在电力系统中的应用研究得到了突破性进展,美国、日本、法国等技术发达国家先后研制出多种光学电子式互感器样机,并在实际高压电站长时间运行^[9]。90 年代,国外知名公司陆续公布了它们研制的试验样机及其运行数据,并打出了产品广告。如 1997 年 1 月 ABB 公司推出了额定电流 2 000 A 的 115~550 kV 的光学电压电流互感器的产品介绍^[10]。其绝缘支柱采用内充 SF₆ 气体的硅橡胶复合绝缘子,测量精度达到 IEC 186 精度等级 0.2,整个互感器重量比较轻,550 kV 电压等级的产品总重量仅为 276.7 kg。法国 GECALSTHOM 公司在美国 Bonneville 安装了 525 kV 的光学电压/电流互感器,其后,又陆续在荷兰、比利时、加拿大和法国等国的变电站挂网试运行,1997 年又推出了 123~765 kV 光学电压/电流互感器的产品广告^[11],该互感器可同时输出计量和保护用信号,测量精度可达 0.2%。北美的 NxtPhase 公司于 2000 年 3 月在 Surrey, British Columbia 的 BC Hydro's Ingledow 变电站,安装了 230 kV 电压等级的光学电压互感器^[11];2001 年 10 月又在 Montreal 岛的 Rolls Royce gad 发电站安装了 138 kV 电压等级的三相系统,并计划将电压等级推广到 765 kV。

我国对光学互感器的研究起步较晚,沈阳变压器研究所从 1970 年开始研究,以后在清华大学、四平电业局的积极协助下于 1979 年研制出第 1 台样机,并先后研制出 3 台样机在四平电业局的 220 kV 线路上试运行,后来于 1984 年退出运行。国家对光

学电子式互感器的研究工作非常重视,将其列为“七五”、“八五”重点研究项目,先后有清华大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学和西安交通大学等多家科研院所相继从事过光学电子式互感器方面的研究。其中华中理工大学研制的计量用光学电流互感器于1993年在广东新会110 kV电网试运行,尽管未达到计量目标,但标志着我国的光学互感器研究已向实用化迈进^[8]。

2.2 混合电子式互感器

混合电子式互感器是指采用 Rogowski 线圈、带铁心的低功率电流互感器、霍尔器件以及分压器等作为传感器,利用光纤完成从高压端到低压端的数据传输,通常高压传感部分需要电源供电的各类电子式互感器。从20世纪90年代开始,混合电子式互感器作为传统互感器的又一类替代产品,受到人们的广泛关注^[6],其原因可以归为以下几点:①光学电子式互感器技术较复杂,成本高,性能不易做到稳定,实用化进程缓慢;②大规模集成电路技术的飞速发展,促进了变电站二次设备向电子化、数字化发展,互感器与二次设备之间通过数字接口和低电压接口实现互连成为可能;③混合电子式互感器采用的传感器技术比较成熟,运行经验多,具有实用化优势;④采用光纤进行信息传输,大大简化互感器的绝缘结构,适用于高电压系统。

国外从事混合电子式互感器研究的有意大利的 Polytechnic of Milano 大学,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^[3]。混合电子式互感器在国外的速度较快,其中在新型中压开关柜和高压 GIS 装置中的使用正处于推广使用阶段。现有多家开关厂生产的开关柜中开始使用由 Rogowski 线圈和电阻分压器构成的电子式互感器,这些互感器配合微机保护和电子仪表的使用,对于减小开关柜体积、提高其性能起了重要的作用。混合电子式互感器作为户外高压互感器应用时,需要考虑传感头的供电问题,目前的供电方式主要有利用传统 CT 从母线上取电能、利用蓄电池供电和利用激光电源供电等方式,国外研制的混合电子式高压电力互感器主要采用激光供电的方式。

我国对混合电子式互感器的研究开始90年代中后期,从事研究的单位有: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^[7]。研究涉及了高压 GIS 装置和户外高压互感器等方面的应用,经过近十年的发展,积累了一定的试验和现场运行经验。近年来,随着传感头的工业化设计,高压端电源设计、数据调制传输方案确定、标准化接口设计、电磁兼容和可靠性设计以及系统误差

补偿等问题的提出和研究逐步深入,越来越多的混合电子式互感器样机已进入或准备进入挂网试运行阶段,这标志着我国混合电子式互感器的研究正逐步进入实用化。

3 混合电子式高压电力互感器的实用化问题

混合电子式高压电力互感器的实用化问题可以概括为传感头的工业化、高压端电源、数据调制传输、标准化接口、可靠性和电磁兼容以及误差补偿等。随着混合电子式高压电力互感器进入实用化,围绕实用化问题进行深入研究显得越发的必要和紧迫。

3.1 传感头的工业化

首先,传感头的工业化要解决测量的稳态精度、暂态精度及稳定性问题,它们是混合电子式互感器进入实用化的根本^[4];其次,传感头的工业化还应涉及传感头的互换性问题,它是混合电子式互感器更好地进入实用化的保证,IEC 标准指出,电子式互感器应能在某些元件更换后无需校准仍保持其准确级的要求。

3.2 高压端电源

高压端电源是混合电子式互感器传感头正常工作的保证。它的设计要求是:①满足高压端电路的功率需求;②必须不间断地长时间稳定工作;③不能破坏高、低压之间的绝缘。在研究过程中,人们曾经提出多种供电方案^[5],现在通常采用的方案为:悬浮 CT 供电、激光供电、蓄电池供电以及它们的组合方案。悬浮 CT 供电具有自具性,输出功率大,但有工作死区;激光电源无工作死区,可靠性高,但是输出功率小(一般在200 mW左右),成本高;蓄电池存在寿命问题,只用作后备电源。

现阶段,高压端电路的低功耗设计是解决电源矛盾的主要方法。在未来,研制满足绝缘要求、可靠性高,输出功率较大的电源是十分必要的。

3.3 数据调制传输

混合电子式互感器要利用光纤完成从高压端到低压端的数据传输,调制方式的选择依据为:①是否满足低功耗设计的要求;②是否可以保证工作的精度和稳定性;③是否满足标准化接口的要求。

人们曾经提出的调制方案有:相位调制、波长调制、强度调制、颜色调制、频率调制以及 A/D 转换等^[1,3]。前4种方案属于模拟调制,相位调制和波长调制利用逆压电效应进行调制,高压端不需要电源,但同光学互感器一样,测量精度受温度、振动和环境因素等的影响,强度调制是将电压信号转换成光强信号传递,结构简单、价格低廉,但测量精度低;颜色调制是光强调制的改进型,利用电压颜色转换器(如液晶)调制信号,该方法灵敏度好于强度调制。后两种方案属于数字调制。频率调制是较早期的方案,利

用压频变换器进行信号调制,具有良好的抗干扰能力和温度稳定性,缺点是功耗较大,等效分辨率低。A/D转换稳定性好,准确度高,低功耗器件多,是目前普遍采用的方案。

现阶段A/D转换方案需要解决的问题有:如何保证数据传输的可靠性、如何满足低功耗设计的要求及如何协调数据传输中的时序。

3.4 标准化接口

标准化的接口是电子式高压电力互感器进入实用化的要求,与二次设备的连接和产品的校验都要以标准化接口为前提。近年来,IEC陆续推出相关标准,为标准化接口设计指出了明确的方向,其中基于以太网的数字接口为标准化接口的发展主流^[1-4]。

国内关于标准化接口的研究刚刚开始,目前工作主要围绕IEC标准的分析、接口的软硬件实现等几方面展开^[5-7]。

3.5 可靠性和电磁兼容

安全可靠运行是电力系统的基本要求,而作为电力系统基本设备之一的电子式高压电力互感器,同样应具备相应的可靠性水平。IEC标准明确规定:电子式互感器的可靠性要求与变电站用电子器件相类似,所以电子式电压互感器应同等对待。相对于传统互感器近一个世纪的运行实践经验而言,电子式高压电力互感还只是一个新生事物,在其可靠性分析、使用寿命预计、连续运行数据分析以及电磁兼容等方面,有待深入开展工作。

3.6 系统误差补偿

混合电子式高压电力互感器是由多个环节构成的测量系统,因此系统误差补偿是涉及每个环节的综合问题。目前,人们从传感器的原理和工艺、电子电路的误差分析、传输线路的抗干扰等方面,对系统误差补偿做了不同程度的分析和研究,随着电子式互感器各实用化问题研究的深入,系统误差补偿的研究也将不断深入^[8-11]。

4 电子式高压电力互感器在电力系统中的应用

目前,在电力系统中广泛应用的以微处理器为基础的数字化保护装置、计量测试仪表、运行监控系统以及发电机励磁控制装置,都要求采用低功率、紧凑型的电压和电流互感器代替常规的电压和电流互感器,电子式高压电力互感器对电力系统特别是提高设备的安全性和可靠性具有重要意义。

4.1 电网动态观测

电网动态观测是以相量测量单元(PMU)为基础的广域测量系统(WAMS)。PMU的前端是基本的电流和电压测量,电流互感器和电压互感器的动态测量精度是准确观测电网动态过程的基础。传统的

电磁式电流互感器不能很好满足动态测量的要求,而Faraday磁旋光效应电流互感器,具有大范围的线性测量能力,不存在测量频带问题,是理想的动态测量装置。

4.2 电子式互感器对继电保护的影响

高可靠的保护原理依赖高精度测量,特别是故障情况下的动态测量。传统的电磁式互感器动态测量能力差,尤其是电流互感器,而具有准确动态测量能力的电子式互感器,不仅能够准确测量故障的基波,且能够准确测量非周期分量和各次谐波。一方面,在确保可靠性的基础上,可以简化现行保护装置的逻辑和判据;另一方面,在充分利用准确故障动态信息的基础上,可以产生实用化价值的保护新原理,比如利用非周期分量和各次谐波分量准确测量的保护方法。目前已经有了以电子式互感器为测量基础的保护装置挂网运行案例。

以光学互感器为基础,未来可能会实现光学保护的概念:按照保护原理、光强信号直接运算和判定,光学保护将具有更高的可靠性和快速性。

4.3 电子式互感器在数字化变电站中的应用

准确的电流/电压动态测量,可以为提高电力系统录波、测距和定位的准确性和可靠性奠定测量基础。电子式互感器是数字变电站和数字化电力系统的测量来源。

目前研究较为成熟并投入变电站运行的主要是有源电子式互感器,应用场合主要有高压直流输电、SF₆气体绝缘开关(GIS)及中低压开关柜等。无源光电互感器因其一次侧光学电流、电压传感器无需工作电源,具有较大的优势,但光学传感器的制作工艺复杂,稳定性及一致性不易控制,因此有源电子式互感器有望首先得以推广应用。

日本1000kV特高压试验场就应用了电子式互感器技术。国内已有数十个应用了电子式互感器的数字化变电站成功运行,如:在太行山区35kV变电站运行的OCT(光学电流互感器)和在黑龙江黑河市110kV变电站运行的OCT(光学电流互感器)等,这将给国内乃至国际变电站的自动化运行和管理带来深远影响和变革,具有非常重大的技术和经济意义。

(1)在技术上,提高设备的安全性和可靠性;避免信号传输和处理带来的附加误差,提高保护、测量和计量系统的精度;减少自动化设备数量,简化二次接线,提高系统的可靠性;设备具有互操作性,可以实现信息在运行系统和其他支持系统之间的共享。

(2)在经济上,不再敷设大量电缆和二次光纤接线,缩短工程周期;减少通道重复建设和投资,方便变电站的扩建及自动化系统的扩充;减少投运时间及设备的退出次数和退出时间,提高设备的使用效

率,方便设备的维护和更新,减少变电站寿命周期内的总体成本。

5 结语

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。电子式电流互感器是电网动态观测、提高继电保护可靠性和数字电力系统建设的基础装备,将在现代电力系统中发挥重要的基础测量作用。随着微机保护的广泛应用,二次保护设备不再需要高功率的输出信号。电子式互感器以其高精度、高可靠性、宽频带等特点和在实际应用中表现的优良特性表明:ETA/ETV 完全能够适应电力计量和继电保护数字化、自动化的发展潮流,并将成为未来互感器发展的主流方向。

参考文献:

- [1] IEC 61850.Communication Networks and Systems in Substation:Part9-1·Geneva:International Electro Technical Commission[S].2003.
- [2] BRAND K P.The Standard IEC 61850 as Prerequisite for Intelligent Applications in Substations[C]//Power Engineering

Society General Meeting,2004:714-718.

- [3] STEINHAUSER F.New Challenges with Substations Utilizing Communication Networks[C]//Power Tech. Conference Proceedings, Bologna,2003:225-229.
- [4] SHEPHARD B,JANSSEN M C,SCHUBERT M.Standardised Communications in Substations[C]//Developments in Power System Protection,2001,Seventh International Conference on IEE,Amsterdam,2002:543-547.
- [5] 李红斌,余春雨.电子式互感器数字输出的研究[J].高电压技术,2004,30(2):10-12.
- [6] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.基于 IEC 61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J].电力系统自动化,2004,28(21):38-42.
- [7] 黄智宇,段雄鹰,张可畏,等.电子式高压互感器数字接口的设计及实现[J].电力系统自动化,2005,29(11):87-90.
- [8] 段雄鹰,邹积岩.小波变换在电子式电力互感器误差校正中的应用[J].电工技术学报,2002,17(6):93-96.
- [9] 钱政,梅志刚,罗承沐.电子式互感器中数据采集系统的实现与误差补偿[J].高压电器,2004,40(1):37-39.
- [10] OATES C D M,BURNETT A J,JAMES C.The Design of High Performance Rogowski Coils [C]//International Conference on Power Electronics,Machines and Drives,2002:568-573.
- [11] NIEWCZAS P,CRUDEN A,MICHIE W C,et al.Error Analysis of an Optical Current Transducer Operating with a Digital Signal Processing System[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2000,49(6):60-65.

(上接第 102 页)

的方法,从而为电力用户获取更为直接的温度参数提供了新的途径;分析了 GIS 红外温度监测的特点,有效地克服了 GIS 中导体的低发射率和 SF₆ 气体的温室效应问题,并将此问题转化为普通的红外测温问题。GIS 温度在线监测的实现,将在及时发现异常温升、避免引发严重故障中发挥重要作用。

(上接第 105 页)

情况下,上述电弧性故障判断电路对故障类型的判断非常准确;在接地电阻达到几百欧姆以上时,通过调整比较器的参考值其判断结果也相当准确。

4 结语

(1)笔者提出的单相接地故障类型判断方法简单可靠,电路所需元件全部是常用元件,易于维护,工程实用价值高。

(2)如果单相接地电阻比较高时,应该适当调高比较器的参考值设定水平,以保证判断电路的可靠性。这有赖于线路走廊的地理条件及运行经验。

参考文献:

- [1] 张纬钹,何金良,高玉明.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华

参考文献:

- [1] 刘卫东,黄瑜琮.GIS 局部放电特高频在线检测和定位[J].高压电器,1999,35(1):11-15.
- [2] 金力军,胡青,邱国海,等.GIS 电晕放电监测[J].高电压技术,2005,31(3):25-27.
- [3] 徐淦卿,陈钰,程东杰.红外物理与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,1989.
- [4] 陈衡,侯善敬.电力设备故障红外诊断[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [5] 大学出版社,2002.
- [2] 刘渝根,丁伯剑,袁涛.山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[J].高电压技术,2006,32(1):32-34.
- [3] 税正中,施怀瑾.电力系统继电保护[M].重庆:重庆大学出版社,1997.
- [4] 牟道槐,李玉盛,马良玉.发电厂变电站电气部分[M].重庆:重庆大学出版社,1996.
- [5] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [6] 戴伏生,毛兴鹏,王好贤,等.基础电子电路设计与实践[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [7] 阎石.数字电子技术(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 丁伯剑.山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[D].重庆:重庆大学电气工程学院,2004.