

电子式电流互感器应用现状及发展趋势^{*}

陈佳旗 贾春荣 邸志刚 刘继腾 卓越

(华北理工大学电气工程学院 唐山 063210)

摘要: 电流互感器在电力系统的交流电测量、继电保护、电力设备检修控制等相关领域均具有十分重要的地位。目前电磁式电流互感器逐渐暴露绝缘差、抗干扰能力弱等多种缺点,而电子式电流互感器凭借自身绝缘性好、体积小、可数字化等特点有望成为未来电气领域检测电流的主要设备。本文以电子式电流互感器的研究发展现状切入,通过空心线圈电流互感器(即 Rogowski 线圈式电流互感器)、低功率电流互感器(LPCT)、光学电流互感器展开进行系统论述,重点分析各自的组成结构及工作原理,并对其优缺点进行总结,提出改进之处。在此基础上指出电子式电流互感器在设备供电、环境适应、传感方式等方面所面临的挑战,并从传感机制和传感材料对其未来的发展趋势做出展望。

关键词: 电子式电流互感器;Rogowski 线圈;低功耗电流互感器;光学电流互感器;发展趋势

中图分类号: TM452 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Development status and challenges of electronic current transformer

Chen Jiaqi Jia Chunrong Di Zhigang Liu Jiteng Zhuo Yue

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Current transformer plays an extremely important role in AC measurement, relay protection, maintenance control of power equipment and other related fields of electric system. At present, electromagnetic current transformer has exposed many shortcomings gradually, such as poor insulation and weak anti-interference ability. while electronic current mutual inductance is expected to become the main equipment for detecting current in the future due to its good insulation, small size and digitalization. By describing the research and development status of electronic current transformers, this paper focuses on Rogowski coil current transformers (Rogowski coil current transformers), low-power current transformers (LPCT) and optical current transformers, by analyzing their respective structures and working principles, this paper summarized their advantages and disadvantages, and put forward some improvements. On this basis, it pointed out the challenges faced by electronic current transformers in equipment power supply, environmental adaptation, sensing methods, etc., and looked forward to its future trend from the sensing mechanism and sensing materials.

Keywords: electronic current transformer; Rogowski coil; low power current transformer; optical current transformer; development trends

0 引 言

电流互感器作为现场测量一次侧电流的常用计量设备之一,它在电力系统的三相交流电测量、高电压技术、变电站等领域均具有极其重要的地位^[1]。其目的主要是在不改变频率的情况下将电力系统中一次侧大电流按特定变比转换成二次侧小电流,以供仪表读取,达成保护和测量的目的^[2]。目前在电气领域普遍使用的是电磁式电流互感器,但随着未来我国电网规模扩大和电压等级的不断提高,长

距离、大容量输变电越来越普遍,而传统的电磁式电流互感器受输电导线磁场干扰逐渐显现出电气绝缘性差、暂态响应范围小、动态测量范围小等缺点^[3-4]。在这种背景下,人们开始研究开发一种抗电磁干扰性能好、测量范围大、频率响应范围宽、体积小新型电流互感器,以光学和电子学原理为基础探索而出的电子式电流互感器(electronic current transformer, ECT),不仅弥补了传统电磁式电流互感器的不足,还具备质量小、暂态特性好、能实现瞬态保护等优点^[5-6]。

收稿日期:2022-03-23

^{*} 基金项目:河北省教育厅科学技术研究项目(ZD20131024, ZD2021332)、华北理工大学培育基金(SP201502)项目资助

在国外,人们对电子式电流互感器的研究已经有 50 多年的历史,其中如 Asea Brown Boveri Ltd、ALSTOM、SIEMENS 等电气巨头都已推出了各自的电子式电流互感器,并且已经由实验阶段进入了工业实用阶段。相对而言,我国在电子式电流互感器开发上的科研工作起步较晚,尤其受精密光学设备的技术限制,始终处于较慢的发展阶段,随着电力系统输变电负荷等级的不断提高,国家将其列为“七五”、“八五”的重点研究跟踪项目,各大研究所和高校也纷纷加入。到 1993 年,华中理工大学所研制的计量用光学电流互感器在广东新会的 110 kV 电网进行试运行,虽然最后结果尚未满足要求,但也标志着我国电子式电流互感器的研究正式从理论转向实用化研究阶段^[7]。此外,2002 年颁布的 IEC 60044-8(电子式电流互感器)和 2003 年颁布的 IEC 61850(变电站网络和系统)更是共同为电子式电流互感器的进一步发展和研究推广做出了政策推进。

根据 IEC 和 GB/T 标准,电流互感器按原理可分为:光学电流互感器、空心线圈电流互感器(即 Rogowski 线圈式电流互感器)、铁心线圈式低功率电流互感器(LPCT),它们的一二次测的信号传递主要依赖于基于光纤所架构的光纤传输系统,这也是与传统电磁式电流互感器的主要区别之一,可以有效减少输电线路周围磁场对测量信息的干扰,并且因为光纤优良的绝缘特性,使得设备在高低压环境下完全隔离,安全性高,测量结果经过光纤传输系统可在电子式电流互感器二次部分的积分电路中进行集中转化处理,然后输出模拟信号或者数字信号^[8]。根据电流互感器的一次侧部分电子设备是否需要提供工作电源,可将上述几种电流互感器分为有源型电子式电流互感器和无源型电子式电流互感器。

1 有源型电子式电流互感器

有源型电子式电流互感器主要指一次侧传感元件需要电源供电的一类电流互感器,其原理如图 1 所示。

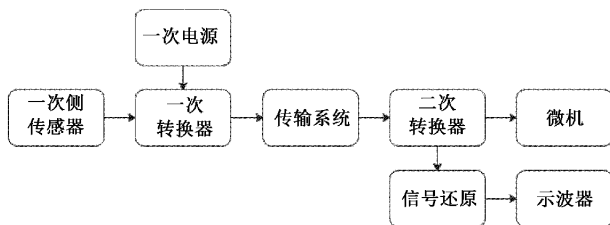


图 1 有源型电子式电流互感器原理

目前的有源型电子式电流互感器通常使用罗氏线圈作为一次侧检测装置去感应被测电流,同时由于其自身整体呈空心环状结构,也被称为空心线圈。基于法拉第电磁感应定律和安培环路定律^[9],当一次侧导线穿过线圈时,会引起线圈环绕部分内的磁场发生变化,此时按照安培环路定律便可以计算得到所要检测线路的电流大小。高压侧的电子电路(即一次转换器)承担信息采集和电光信号转换的功

能,而对这部分电子模块的供电技术主要有激光供能、蓄电池供能、微波供能及在线供能等方式^[10-11]。经过处理后的信息,会由光纤传输系统送到二次侧进行信号处理,最后在仪器上呈现出来。有源型电子式电流互感器运行结构如图 2 所示。

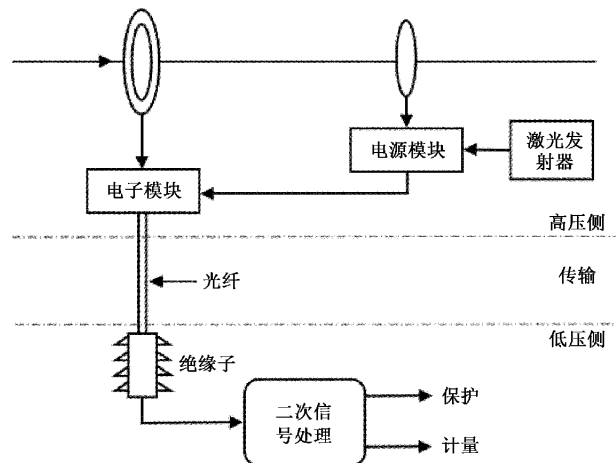


图 2 有源型电子式电流互感器运行结构

1.1 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器

Rogowski 线圈结构上是一个空心环形线圈,通常由漆包线经过紧密绕制在环形龙骨上制成,根据骨架材料性质不同可分为柔性和硬性两种,多为陶瓷、塑料等非铁磁性材料制作,无磁滞效应。同电磁式电流互感器相比,不存在磁饱和现象,而且其测量范围大,响应频带宽,成本低,因此多应用于有源型电子式电流互感器的信息采集部分^[12]。罗氏线圈结构如图 3 所示。

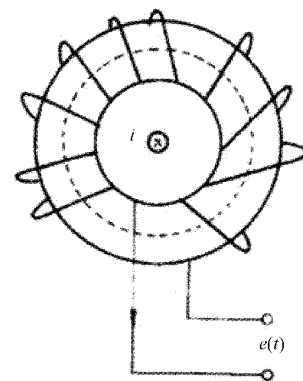


图 3 罗氏线圈结构

如图 3 所示,线圈的骨架围绕着待测线路,当线路中有电流 I 通过时,导线周围磁场会随着电流大小的变化而变化,与此同时围绕在骨架上的绕线会感应出相应比例的电动势^[13]。

$$e(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \times \ln \frac{Rb}{Ra} \quad (2)$$

式中: $e(t)$ 为线圈两端的感应电压, M 为线圈的互感系数, 由其自身决定, $\frac{di(t)}{dt}$ 表示电流的变化, 其中 h 为线圈的截面高度, R_o 、 R_i 分别为线圈横截面的内外线径, μ_0 为真空磁导率, n 为线圈匝数。通过式(1)可看出, 当线圈匝数不变时, 电流的微分值同 Rogowski 线圈所产生的感应电动势呈正比关系, 然后对放大电路进行积分后即可得到电流大小。

因为 Rogowski 线圈具备绝缘结构简洁、线性度好、测量精确等优秀特点, 故在早期有源型电子式电流互感器中经常充当信息采集的角色, 用以准确感应出被测电流的磁场强弱变化, 并通过一次侧的电子模块将接受到的微弱电信号转换为光信号, 经由光纤传输到低压侧进行二次信息处理作业(即对光信号进行解调转换为电信号), 最后通过微分计算得出结果, 达到对被测电流大小检测的目的^[14]。

但该类电流互感器也存在一些不足之处, 位于一次侧的电子模块需要电源供能, 而现有供能技术存在无法长期稳定有效供电的问题。此外罗氏线圈必须同积分器进行配套使用, 目前常用积分器有数字积分器、模拟积分器^[15-16]。其中数字积分器依赖于数值计算方法的发展, 而模拟积分器虽然简单易于实现, 但对温度和时间漂移过于敏感。此外积分器在直流偏移、积分初值和输入饱和等问题上也会影响到测量的精度^[17-18]。除此之外, 在谐波功率测量^[19]中, 当电压电流相移接近 90° 时, 也会出现较大误差。对于上述误差, Li 等^[20]提出了一种具有频率自适应性的数字积分算法, 使得在谐波电流测量中误差下降到 0.01 以下, 还消除了工频附近频率波动的问题。

随着光电技术的不断发展, 罗氏线圈在实际应用上的问题也被逐步解决, 但在测量精度上始终无法取得较大突破, 主要因为传统罗氏线圈普遍依靠人工绕线的方法, 不仅绕制工艺复杂, 而且绕线的密度和横截面积也不匀称, 从而使得线圈无法进行批量生产, 限制了其工业发展^[21]。对此有学者开始寻求一种新型的罗氏线圈, 位于瑞士的苏黎世联邦理工学院提出了 PCB 型罗氏线圈, 进一步拓宽了电子式电流互感器的发展。

该线圈工作原理与普通罗氏线圈相一致, 结构如图 4 所示, 它主要通过机器将线圈直接印制在 PCB 板上, 从而提升绕制精度, 不仅使得生产效率大大改善, 另外机械印制解决了手工过程中存在的线圈密度分布不均等问题, 提升了线圈的测量精度和稳定性^[22-23]。

PCB 型罗氏线圈结构上为双面板, 前后两面呈均匀放射环形, 绕线穿过内径的过孔进行连接, 由图 4 可看出线匝的分布均匀密集, 其中实线为正面布线, 虚线为背面布线。同传统罗氏线圈相比, PCB 罗氏线圈的最大优势是结构通过计算机软件进行设计后再进行加工, 绕制精度高, 线匝和截面积均匀且参数分散性小, 缺点是容易受 PCB 板的空间大小影响, 因为受其空间制约, 会使得线圈的截面积较小,

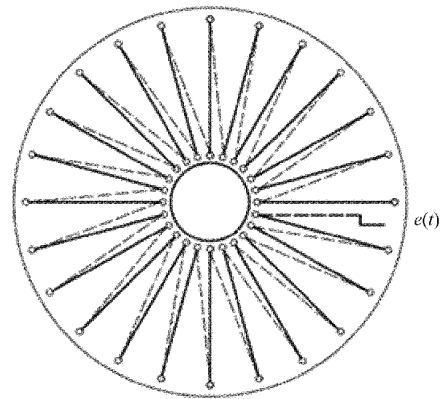


图 4 PCB 型罗氏线圈结构

此外由于匝数相对也较少, 也会致使线圈的互感系数比较小。另外由于 PCB 板的热胀系数较大, 所以易受温度影响, 经过实验比对, 一般生产中会选用热膨胀系数小且性价比高的聚四氟乙烯板。

新型 PCB 罗氏线圈的测量精度十分高, 但受限于制作水平, 外界磁场等因素容易对其灵敏度造成干扰, 因此提高线圈的互感系数迫在眉睫, 由式(2)可得, 线圈的互感系数大小与匝数 N 、板的高度(厚度) h 、内外径比值大小相关, 因此可通过以下方法增加线圈互感系数:

1) 增加厚度 h , 由于对 PCB 板的利用率考虑, 通常取 $2.5 \sim 3.3 \text{ mm}$ 。

2) 增加线圈的绕制匝数, 线圈的匝数越大, 互感系数也越大, 但得到更多的匝数, 这就要求导线更细, 过孔更加密集。

3) 增加内外径的比值大小, 即 R_o/R_i , 可在外径不变的情况下缩小内径, 或者内径不变的情况下扩大外径, 在目前工艺允许下, 外内径的合理比值范畴可在 $1.6 \sim 2.4$ 之间。

上述方法中无论是增加厚度, 还是增加线圈匝数, 最终都会受到制作工艺和 PCB 板的空间限制, 对线圈参数的优化程度有限, 故可通过增加线圈个数这一简便方法, 来达到提升测量准确度和抗干扰的目的^[24]。

随着广大学者近几年来对 PCB 型线圈的研究探索, 陆续出现一些新型 PCB 型罗氏线圈。为解决 PCB 板高度对测量结果的影响, 有学者设计出一种插入式的罗氏线圈, 将一个主板与多个插板进行组合构成, 并在各个插板之间布置回线以减少它们之间的垂直干扰误差, 与普通罗氏线圈相比, 截面上具备了更多线圈, 也增加互感系数, 使得测量范围和稳定性都有所提高^[25-26]。另外, 针对电源模块可靠性, 学者 Tsukuda 等^[27]提出一种线夹型 PCB 电流互感器, 该互感器体积小, 精度高电源模块稳定性较高, 可以作为功率模块内建的电流互感器。除此之外还有平板式、拆装式、开合式 PCB 罗氏线圈, 这些都有力的推动了有源型电子式电流互感器在电力系统的发展。

1.2 低功耗线圈电流互感器

在研究电子式电流互感器的过程中,人们发现涉及到光学元件部分易受到温度等环境成分的干扰,因此人们开始在传统电磁式电流互感器进行探索,秉持着高阻抗电阻的设计理念推出了低功耗线圈电流互感器,其电路原理如图 5 所示。它的输出信号由电子技术进行计算处理,并采用经过特殊处理的高磁导率铁磁材料减小设备尺寸,不仅解决了电流互感器在大电流或短路电流下产生磁饱和的问题,而且扩大了电流测量范围。与传统电磁式电流互感器相比,最大特点是其饱和性得到改善,作为新旧电流互感器的过渡形式,同罗氏线圈相比技术更加成熟且易于进行工业化生产^[28]。另外因为 LPCT 的二次负荷较小,再加上铁磁材料的快速发展,现在 LPCT 已经可以完成对大动态范围电流的测量。

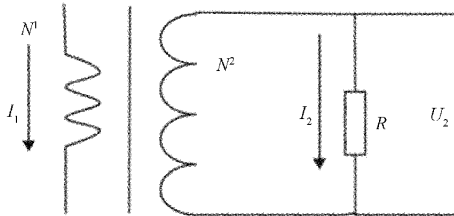


图 5 LPCT 电路原理

由图 5 可看出 LPCT 的输出电压与高压侧电流大小成正比关系,公式如下:

$$U_2 = R \times \frac{N_1}{N_2} \times I_1 \quad (3)$$

其中, R 为其输出电压为采样电阻, N_1 为高压侧匝数, N_2 为低压侧匝数, I_1 为高压侧电流。LPCT 首先会在一次侧采集信号,然后将其输送到后面的采样电路,之后会对这些电信号进行数据处理,并将其转换成光信号发送出去,经由光纤传输到低压侧信号接受单元,按照设备要求进行二次信号处理后输出,其系统结构如图 6 所示。虽然 LPCT 处在低功耗状态下,但磁化电流仍会对其产生影响。故有学者提出一种非线性补偿技术,利用线性电路和非线性数字控制率,通过追随 LCPT 输出电压、构建电压同相和正交分量,然后完成电流转换,从而消除磁化电流的干扰,实现补偿目的^[29-30]。

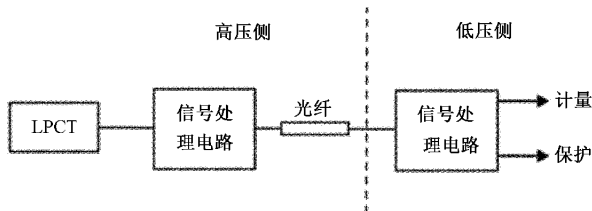


图 6 LPCT 系统结构

2 无源型电子式电流互感器

当一束偏振光穿过放置于磁场范围中的介质时,该偏

振光的振动方向将发生改变,该现象即为法拉第效应,原理如图 7 所示。

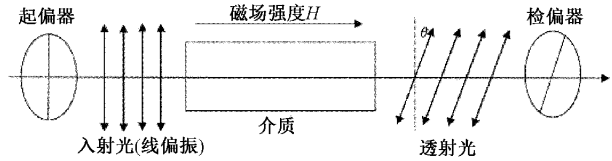


图 7 法拉第效应原理图

依据这一特殊磁光效应,人们研发设计了无源型电子式电流互感器。由于该类电流互感器的信号传感检测部分是紧密复杂的光学系统,因此不存在供电装置的需求,系统的线性度也比较好^[31]。在结构上,根据传感头结构不同,可分为全光纤型电流互感器和磁光型光学电流互感器。无源型电子式电流互感器在工作过程中,光源首先会发射出一束光通过耦合器,再通过起偏器转化为线偏振光,然后穿过放置于磁场中的介质,此时线偏振光的角度将发生改变,经过检偏器检测后通过光电转换模块,将光信号转换成电流信号并进行数据计算处理,最后得到被测线路的电流大小。其主要缺点是传感部分由光学系统构成,其光束折射效应容易随着温度等环境因素的变化而变化,从而影响检测的精准度^[32]。

2.1 磁光型光学电流互感器

磁光型电流互感器主要工作原理为法拉第磁光效应,即沿磁场方向传输的偏振光,在通过放置于磁场中的介质时,平面偏振光的偏振面会产生旋转^[33],其旋转角计算公式为:

$$\theta = V \int H dl \quad (4)$$

式中: θ 是偏振光的旋转角度, V 是材料的 Verdet 常数, H 是磁场强度, l 是光束穿过介质的长度。该电流互感器工作时主要利用光电探测器测量偏振光的偏振角,并根据公式 4 进行相关数据计算处理,最后达到测量电流大小的目的,磁光型电流互感器运行结构如图 8 所示。

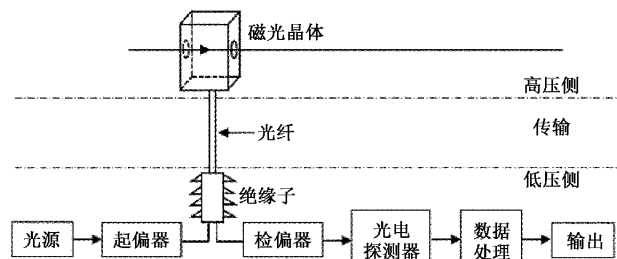


图 8 磁光型电子式电流互感器运行结构

由图 8 可以看出磁光型电流互感器的信号处理模块一般位于低压侧,运行条件较传感部分相比优越且稳定,故该类电流互感器关键技术在于传感部分的稳定性,目前磁光型电流互感器用来感应磁场变化的常用材料有磁光玻璃和磁光晶体。磁光玻璃作为早期光学电流互感器的核心感应

材料,因为其 Verdet 常数较低且易碎,迟迟无法推广投入实际应用中。学者 Chen 等^[34]制备了一种用于电流互感器的高 HMO 掺杂的 $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 玻璃,该型号玻璃热稳定性好、机械硬度和 Verdet 常数都比较高,经试验对光学电流互感器的性能提高十分明显。另外随着材料工艺的高速发展,磁光晶体的出现更大程度上弥补了磁光玻璃性能上的不足,其作为现在科学技术合成的一种新型光学材料,具有更大的磁光常数,高导热性,低的光损失和高激光损伤阈值,现阶段常用的种类有铁铝榴石、镁铝榴石等^[33-36]。

除此之外,由于该类互感器在传感部分存在多处反射结构,这导致光束在反射过程中会发生相移,从而对测量的准确度造成一定程度影响。针对这些问题,国内外学者提出了相应改善措施。Wan 等^[37]提出了一种将具备渐变折射率的块状光学玻璃和作为磁场集中器的铁磁环组合而成新型传感头,从而避免因反射相移引起的系统误差。

2.2 全光纤型电子式电流互感器

随着光纤技术的发展,自 20 世纪 70 年代起,光纤就开始应用到光学电流互感器上,尤其在 1986 年学者 Lassing 和 Oomens 实现了利用法拉第磁光效应完成对电流的测量,随后大量学者开始对其研究。全光纤电流互感器主要是应用了光纤的偏振特性,通过旋光角的测量来间接完成对被测电流的测量^[38]。因为该类电流互感器的传感部件和传输部件均采用光纤材料,其抗电磁干扰能力也得到大大提升,另外其独特的光纤传感环结构也杜绝了很多环外的干扰影响^[39-40]。此外按照全光纤电流互感器的光路构造的不同,可分成 Sagnac 干涉式和反射式。

因为早期的光纤电流互感器都是通过直接测量偏振角大小来测量电流,该方法十分限制于检测信号正弦函数的非线性,而且测量范围相对较小。为解决该问题,学者 Nicati 等^[41]提出了一种 Sagnac 结构的电流互感器,大幅度提升了光纤电流互感器的动态测量范围,并沿用至今。该结构借鉴于光纤陀螺仪技术,如图 9 所示,主要是将来自同一光源的两束偏振光进行反方向传播,在交汇于同一点时进行干涉,最后对这两束光的相移进行检测解调,完成对电流的测量。该类结构电流互感器中易出现光纤环形干涉仪高的解调频率问题,为此学者姜凤贤等人提出了一种基于反射式横向光光调解的非互易相位调制结构^[42],不仅解决了调制频率的问题,而且简化光纤检测手段,保证可靠性的同时降低了制作成本。

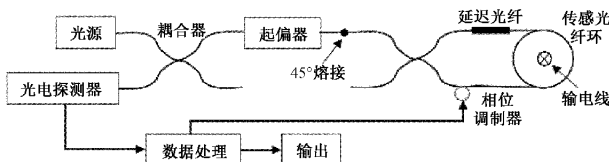


图 9 Sagnac 干涉式电流互感器

而反射式结构是一种单光路光纤电流互感器,如图 10 所示,与 Sagnac 干涉式相比,该类电流互感器呈共光路结构,并且在传感光纤末端追加了法拉第旋转镜,线偏振光传输到此处后,经过反射会使得法拉第旋转角增大一倍,间接增大了电流互感器的灵敏度,除此之外共光路设计结构还可以降低外界震动等因素对光纤的影响。

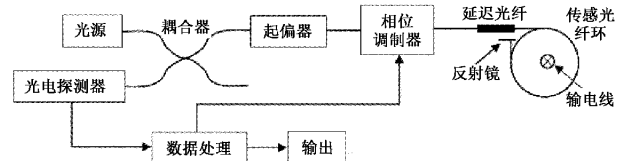


图 10 反射式电流互感器

同磁光型电流互感器相比,全光纤电流互感器的安全性高,抗干扰能力强,但全光纤的构造注定了其测量精度会受到传感光纤的双折射现象影响^[43-44]。双折射一般受温度影响,故有学者提出一种引入光纤环保温腔体的新型光纤传感头^[45],通过改变传感头的保温腔体构造,优化腔壁制作材料,达到提升光纤电流互感器的测量精度和抗温度干扰能力的目的。此外该类电流互感器结构材料中的延迟光纤会对测量灵敏度造成一定的干扰,学者齐岳峰等^[46]提出一种集起偏与相位偏置功能于一体的非互易相位调制器设计,该装置可以消除本征频率的限制,从根本上消减延迟光纤对灵敏度的干扰。另外随着光纤制造技术的进步,出现如光子晶体光纤等性能优越的新型光纤,将更快推进全光纤型电流互感的发展,使之可以早日进入挂网实用阶段^[47]。

3 ECT 的优、缺点

电子式电流互感器同电磁式电流互感器相比,无铁磁谐振现象,测量范围大;高低压环境下可实现完全阻隔,绝缘性能优良;数据传输抗干扰力强等优点。当然该设备也存在一些诸如供能不稳定、长时间运行时,稳定性较低等缺点。表 1 总结了各电子式电流互感器的优缺点。

4 面临挑战与发展趋势

同传统电磁式电流互感器对比,新型电子式电流互感器实现了对电流新的耦合转变,不仅可以应用到变电站、交流电测量上,在电力拖动线路保护、过电压在线监测等多个场景均有广泛的应用前景。但现今对着电力系统输电等级和输电距离的不断提高,还需要电流互感器能在外界复杂环境下进行广域的传感和测量^[48-49]。这使得新时代电子式电流互感器面临以下几个重要挑战:

1) 一次侧供电

有源电子式电流互感器作为电流互感器的一个重要分支,其一次侧长期稳定可靠的供电一直是一个重要问题。尤其在野外作业时,受复杂环境影响,供电电源无法保证电能质量。现有激光供电、太阳能供电、母线取电等手段虽然

表 1 各电子式电流互感器的优缺点

类型	量程/A	精度/%	优点	缺点	应用场景	
有源型电流互感器	罗氏线圈型	1×10^6	0.1	响应频带宽,精度高,成本低	零点存在零漂、温漂	发电厂,变电站
	PCB型罗氏线圈	1×10^8	0.1	生产效率高,体积小,线圈分布均匀,精度高。	测量范围小	线路,电缆保护
	低功耗电流互感器	200~300	0.1~0.2	制作工艺成熟,灵敏度高,运行稳定	大电流测量时易出现饱和	小型设备
无源型电流互感器	磁光型	7.2×10^5	0.2~1	尺寸小,温度稳定性好	易碎,光程长,保偏性差	变电站,电气设备
	全光纤 Sagnac 干涉式	5×10^5	0.1~0.5	测量频带宽	易受震动等环境影响	发电厂,变电站,电缆保护
	全光纤反射式	5×10^5	0.1~0.5	测量频带宽,灵敏度高	长期稳定性差	变电站,电力设备保护

为信号采集的供能提供了必要支持,但在长期稳定运行上仍面临挑战,如激光供能存在老化快,电源转化率低;太阳能供电易于受天气等外界因素干扰;母线取能也会存在“死区”问题(即母线电流较小时,无法满足一次侧电子装置负荷要求)^[50-51]。因此如何解决快速、稳定、高效的供能问题,也是目前电流互感器所研究的重要前沿方向。

2) 测量误差

新型电子式电流互感器在测量过程中需进行多次物理量的耦合转换,每次转换都会或多或少造成能量的损耗,多次转换后势必会将测量误差放大,影响到电流最后的反推结果。经调研无论是哪类电子式电流互感器在测量过程中均会涉及到三到四次物理量的转换,因此亟待寻求新的物理量传感机制以减少测量过程中的能量转换。

3) 复杂环境适应性

随着输电距离的不断提升,大部分电流互感器都将处在复杂的野外环境中进行作业,这些环境的温湿度变化范围很大,而上述的各类电子式电流互感器所用的部分材料,如磁光玻璃,磁敏材料等在温湿度环境下,其物理特性会发生剧烈变化,对最后的测量结果造成较大影响,如何消滅各类外界因素对测量的影响多年以来都是电子式电流互感器的热门研究问题,也是抑制电子式电流互感器普及的重要问题。

4) 直接测量

本文所述互感器大部分工作原理基于交流电的周围的交变磁场。但在直流电的测量中无法适用,而随着我国直流输电工程的增多,包括换电站、太阳能电池等多领域均开始涉及直流输电技术,因此实现直流电的宽频测量,是目前电流互感器急需解决重要问题。

要解决上述挑战问题,实现电子式电流互感器在我国的大面积推广,可以从传感耦合机制,传感材料和传感器系统结构等几个方面做出进一步改进^[52-55],其中包括以下几个主要发展趋势:

1) 新型耦合机制

由于当前大部分电流互感器工作原理依赖于电光效应、磁光效应,无法对直流电完成测量,因此寻找新的宽频带、高兼容性的耦合机制,并尽可能减少测量过程中的物理量转换次数是电流互感器的重要发展方向。

2) 新的传感材料

传统的磁光玻璃等材料逐渐无法满足稳定性需求,随着先进传感材料技术的发展,出现了光子晶体光纤(PCF)一批性能优越的特种光纤,这为传感头的制备提供了新的性能优越的材料,开辟了从传感材料角度解决测量中出现误差问题的新方法,也为电子式电流互感器的发展做出了进一步的推进。

3) 新的传感采样机制

继电保护规范要求,现阶段电流互感器挂网运行需要具备双重采样系统,使得投入成本大大提高,限制的电流互感器的发展,因此研究新的单光路系统^[56],以及考虑过载保护电路和测量电路之间是否可建立兼容关系,将测量和保护功能集中在一条通路上,最大化减少电流互感器的制造成本。

另外电网改造和电力系统数字化、智能化的要求,电子式电流互感器势必成为智能变电站的重要装置,它将处在智能电网的最前端位置,承担信息收集的重要任务。另外电子式电流互感器所综合的各种学科工程应用技术,也可以为智能变电站的运行保驾护航^[57-59]。此外,由于全国变电站中 GIS 的应用数量十分巨大,而它的特点也是体积小,智能化程度高,将电子式电流互感器同其进行结合应用,可以更好的促成 GIS 变电站的信息化管理,从而提高变电站运营的稳定性^[60],这都对推动电力系统自动化发展具有重大意义。

5 结 论

面对输电等级日渐提高的电力系统和要求更加智能

化的变电站,基于罗氏线圈、磁光晶体和传感光纤等结构的电子式电流互感器在电磁绝缘性、频率响应范围等性能上具备更鲜明的优势,与此同时,在面对未来电力系统长距离,多场景安全可靠运行也存在巨大挑战^[61]。当前电子式电流互感器存在的问题集中在:一次侧长期高效稳定供电的挑战;温湿度等复杂环境因素对测量精度的干扰;电磁场等物理量转换次数较多,存在转换过程中误差放大的可能;耦合机制单调,针对直流电适用的互感器研究较少。面对这些亟待解决的问题,可以从电流互感器工作原理的耦合机制创新、引进先进的传感材料和设计新型采样系统协助等方面进行攻克。

相信随着国家不断加大对电子式电流互感器的研究力度,其性能终将会同电力系统革新和智能电网的升级改造而变得更加完善可靠,不在局限于对其自身挂网使用的稳定性与可靠性等问题的研究,还将与GIS设备、特高压输电等较为先进技术进行结合发展,成为构建智能电网的重要组成部分,将电流检测设备的发展推入一个新时代。

参考文献

- [1] 杨庆,孙尚鹏,司马文霞,等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
- [2] 赵华云. 电流互感器结合超级电容取电工作原理分析[J]. 电工技术, 2019(20): 15-16.
- [3] 和劭延,吴春会,田建君. 电流传感器技术综述[J]. 电气传动, 2018, 48(1): 65-75.
- [4] LU W, DUAN J, SUN Q, et al. Research status and prospective on current transformer saturation recognition[C]. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Asia(ISGT Asia), 2019: 2589-2594.
- [5] 电子式互感器可靠性检测关键技术及工程应用[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 2, 117.
- [6] 宋涛,冯泽虎. 高精度组合型电子式电流/电压互感器测量技术研究[J]. 仪器与设备, 2021, 09(1): 1-9.
- [7] 朱颖亮,周思瑜. 对智能电网中智能互感器的技术探讨[J]. 电力与能源, 2019, 40(6): 772-774.
- [8] DESSOUKY S S, MANSOUR D A, SHABAN M. Insulation performance enhancement of aged current transformers using nanofluids [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126(1): 106613.
- [9] 周峰,李鹤,李文婷,等. 大电流测量传感技术综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1905-1920.
- [10] 王传川,白世军,李毅,等. 低温环境下电子式电流互感器激光供电情况的分析与研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 135-142.
- [11] 邸志刚,孙腾飞,贾春荣. 有源电子式电流互感器高压侧供电电源[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 120-123.
- [12] WALDI E P, LESTARI A I, FERNANDEZ R, et al. Rogowski coil sensor in the digitization process to detect partial discharge [J]. Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), 2020, 18(2): 1062-1062.
- [13] 张士文,何晓雄. 罗氏线圈互感分析与仿真计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(8): 1072-1074, 1102.
- [14] DENIS B S, ALEXANDER S S. Instrument current transducers with Rogowski coils in protective relaying applications [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 73: 107-113.
- [15] LI Z, WANG Y, WU Z, et al. Research on electronic voltage transformer for big data background [J]. Symmetry-Basel, 2018, 10(7): 234-49.
- [16] GUZMÁN A N, GENNARO S D, DOMÍNGUEZ J R, et al. Enhanced discrete-time modeling via variational integrators and digital controller design for ground vehicles[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2016, 63(10): 6375-6385.
- [17] JIN Y B, ZHANG W D, LOU J, et al. Research of accurate digital integrator for rogowski coil current transformer[J]. IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering, 2019, 12: 249-255.
- [18] 王宇,辛明勇,张炜,等. 数字积分式采集单元的可靠性技术研究[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 191-197.
- [19] CATALIOTTI A, COSENTINO V, CARA D D. Rogowski coil current transducer compensation method for harmonic active power error [J]. Measurement, 2015, 63: 240-251.
- [20] LI Z H, XIANG X, HU T, et al. An improved digital integral algorithm to enhance the measurement accuracy of Rogowski coil-based electronic transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105806.
- [21] WALDI E P. The effect of the core material of the Rogowski coil sensor on the sensitivity of the magnitude of partial discharge [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1041(1): 012011.
- [22] HE LI, ZHEN XIN, XUE LI, et al. Extended wide-bandwidth rogowski current sensor with PCB coil and electronic characteristic shaper[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 29-33.
- [23] SU B, LI X L, ZHENG H Y, et al. Design and analysis of PCB rogowski coil current transformer [J]. Applied

- Mechanics and Materials, 2014, 3546 (672-674): 984-988.
- [24] TSUKUDA M, KOGA M, NAKASHIMA K, et al. Micro PCB Rogowski coil for current monitoring and protection of high voltage power modules [J]. Microelectronics Reliability, 2016, 64:479-483.
- [25] ZHANG G, Liu Y. Positional error analysis of PCB rogowski coil for high accuracy current measurement [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5(3): 375301.
- [26] 沈映. 新型插入式 PCB 罗氏线圈电流互感器设计[J]. 云南电力技术, 2020, 48(6):55-59.
- [27] TSUKUDA M, NAKASHIMA K, TABATA S, et al. Clamp type built-in current sensor using PCB in high-voltage power modules [J]. Microelectronics Reliability, 2017, 76-77: 517-521.
- [28] 阎文博, 侯春光, 高有华. 基于 LPCT 线圈的电子式电流互感器准确度的研究[C]. 第十六届沈阳科学学术年会论文集(理工农医), 沈阳市科学技术协会:中国辽宁沈阳, 2019:316-321.
- [29] VEINOVIC S. Low-power design for DC current transformer using class-D compensating amplifier[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2018, 12 (3): 215-220.
- [30] 刘江仙, 沈利清. 低功耗铁芯线圈型电子式电流互感器的非线性补偿技术研究[J]. 浙江电力, 2011, 30(7): 19-22.
- [31] LIU CH, SHEN T, WU H B, et al. Applications of magneto-strictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: A review [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65:102634.
- [32] 钱文晓, 靳俊杰, 司磊, 等. 光纤电流互感器故障诊断方法研究综述[J]. 高压电器, 2020, 56(8):43-51.
- [33] 李振华, 王尧, 孙婉楨, 等. 光学电流互感器的研究现状分析[J]. 变压器, 2018, 55(5):33-38.
- [34] CHEN Q L. Structural and properties of heavy metal oxide Faraday glass for optical current transducer[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2015, 429: 13-19.
- [35] 孔祥瑞, 刘凯欣, 马骥超, 等. 一种基于 COMSOL 的螺线管聚磁式光学电流传感器设计[J]. 光电子, 2019, 9(3):120-128.
- [36] 克帕依吐·吐尔逊, 李明, 汪齐, 等. 石榴石型直流光学电流互感器及其稳定性研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(2):149-158.
- [37] WAN X, ZHAO J L, WANG M R. A novel design of the sensor head for avoiding the influence of the reflection phase shift in optical current transducer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48 (3): 325-328.
- [38] 郝兆荣, 王强, 达建朴, 等. 基于光学互易回路的全光纤电流互感器的研究与应用[J]. 光电工程, 2020, 47(4): 26-33.
- [39] 商和龙, 李洪全, 周康, 等. 全光纤电流互感器关键器件故障模式分析[J]. 电子测量技术, 2017, 40 (12): 251-256.
- [40] WANG X, MA F, YU J, et al. Design of the portable fiber-optic current transformer for electrolytic aluminum industry[J]. Optik, 2020, 205:164187.
- [41] NICATI P A, ROBERT P. Stabilised current sensor using Sagnac interferometer[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(8): 791-796.
- [42] 姜凤贤, 王燕涛, 齐跃峰, 等. 反射式电光调制非互易相位调制器设计[J]. 光学技术, 2021, 47(2):155-158.
- [43] 邢方方, 许少毅, 白德进, 等. 光纤电流互感器线性双折射测量方法[J]. 光通信技术, 2018, 42(9):59-62.
- [44] WANG L H, ZHANG W P, PANG F B. Error characteristic analysis of fiber optic current transformer with sine modulation[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65:102620.
- [45] 杨燕. 全光纤电流互感器传感头温度效应的机理与抑制[D]. 吉林:东北电力大学, 2018.
- [46] 齐跃峰, 冯麒, 张瑾, 等. 基于无源相位调制器的光纤电流互感器设计[J]. 光学学报, 2019, 39(4):99-107.
- [47] MOHAMMAD S, HOSSAIN M. An ultra-low material loss ellipse core-based photonic crystal fiber for terahertz wave guiding: Design and analysis [J]. Journal of Computational Electronics, 2021:1-8.
- [48] STRASSER T, ANDREN F, KATHAN J, et al. A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2424-2438.
- [49] 李珍, 夏经德, 秦瑞敏, 等. 两端电压差相位的纵联保护在 T 型输电线路中的探究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2):23-27.
- [50] 程志远, 隋立程, 宋凯, 等. 谐振补偿式电流互感器取能方法的研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4896-4902.
- [51] 谢彦斌, 蒋兴良, 胡建林, 等. 典型架空输电线路分段绝缘地线取能研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 947-955.
- [52] 王冰, 蒋磊, 宋福明, 等. 30 kA 闭环式集成霍尔电流传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 188-193.
- [53] SOBHYS D, DIAA E A M, MOHAMMED S, et al. Insulation performance enhancement of aged current transformers using nanofluids [J]. International

- Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126(PA):106613.
- [54] NOBY G, PRASHANTH V, KARTHEEK B, et al. A novel dual slope conversion technique for measurement of ratio and phase errors of current transformer using comparison method of testing[J]. Measurement, 2021, 179:109458.
- [55] 杨杜兵, 张家洪, 陈福深, 等. 铌酸锂集成 MZI 型光波导大电流传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11):87-95.
- [56] GU S L, HAN L, LIU D W, et al. Design and applicability analysis of independent double acquisition circuit of all-fiber optical current transformer [J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(6):532-541.
- [57] STRASSER T, ANDREN F, KATHAN J, et al. A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2424-2438.
- [58] 黎恒焯, 蔡勇, 邹坤显. 智能变电站中电流互感器实时响应性能研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(5):67-71.
- [59] 谢剑锋, 闫军, 卢旻. 高压电流互感器运行状态检测新技术及应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7):169-173.
- [60] BAI S J, YUE F D, ZENG L C, et al. A study to resist conducted interference from GIS bus-charging currents switching for electronic current transformer [J]. Electronics, 2021, 10(8),957.
- [61] ZHU M M, SHU H C, ZENG F, et al. Analysis of ECT effect on accuracy of measurement and protection [J]. Energy Reports, 2021, 7(S1):230-238.

作者简介

陈佳旗, 硕士, 主要从事光电检测技术及仪器等方面的研究。

E-mail: cjql2138@126.com

邸志刚(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感技术及其应用, 智能检测装置及仪器。

E-mail: dzg0512@126.com