

自励源供电系统研究及应用

莫卫东¹, 刘忠战²

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 西安华伟光电技术有限公司, 陕西 西安 710118)

摘 要:报告了一种直接从高压母线获取能量作为电子式电流互感器(ECT)工作电源的原理和实现方案,深入研究分析了自励源供电系统设计中的若干问题及应对策略和方法,成功地制造出了采用自励源供电系统的 ECT 并投入了实用,已被业界认可作为耐用的高压电器产品进入了电力市场。新型 ECT 的唤醒电流只有 0.588 A,唤醒时间小于 20 ms,借助本研究独创性的自励源磁场取能限流“漏斗”(一种特殊的限流组件),很好地解决了自励源供电的 ECT 工程实现中的关键技术难题;饱和和大电流的冲击,加上一些特别的技术措施,使得自励源供电系统能为 ECT 的信号采样变送电路提供一个净化的直流电源,确保了 ECT 测量的精度。本研究所开发的自励源供电的 ECT 整机技术,简化了互感器的绝缘结构,使我国光隔离电子式电流互感器的技术实现了突破,提高了电力系统的综合自动化水平。

关键词:ECT; 磁场取能; 自励源

中图分类号: TM33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)01-0083-05

现代高压输变电测控技术的发展集中在解决 2 方面的问题:其一,随着电网容量不断增大和电压等级的不断提高,与此相关的绝缘系统不仅制造难度越来越大,其制造成本大大超出了电流传感器的成本。在高压电量传感与二次设备实现信息传递的同时,如何有效解决超高-低压间的绝缘隔离是困扰电力界的百年难题;其二,传统互感器的模拟信号连接已不能适应迅速发展的数字化电站、组合电器测控技术数字化、智能化以及网络化的需要。

基于现代电子、计算机、光通信技术的光隔离电子式电流互感器(Electronic Current Transformers, ECT)成功地解决上述难题,在国内外,与该技术相的研究与投入不断增大,并进行了大量的工程实践,在理论和实践上都取得了许多成果。

1 实现 ECT 产品化的技术难题

图 1 是 ECT 用于高压输变电线路测控解决方案的系统架构框图。在此方案中,高压侧传感单元采用的是低功率电流互感器(LPCT)。LPCT 作为一种电磁式电流互感器,不仅输出灵敏度高,性能稳定,而且由于其二次负荷较小,加上微晶高导磁材料的应用,可实现大动态范围电流的测量。

不过,LPCT 传感输出电压信号需要由位于高压侧(一次)信号处理电路转换为数字光脉冲信号,再经由光纤远传至低压端控制室,然后由低压侧(二次)信号处理电路将光信号还原为电信号,从而实现对接高压线

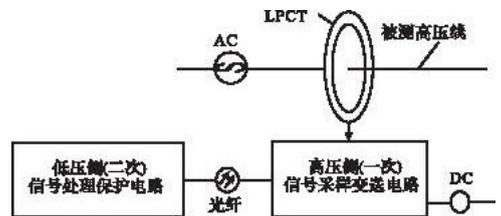


图 1 基于 LPCT 的电子电流互感器应用系统
Fig. 1 Application system of electronic current transformer based on LPCT

* 收稿日期:2008-07-18

基金项目:科技部科技型中小企业技术创新基金资助项目(06C26216100557)

作者简介:莫卫东(1959-),男,广西合浦人,教授,主要从事精密光学测量以及计算机技术应用研究;

E-mail:mwd1999@126.com

刘忠战(1947-),男,陕西临潼人,高级工程师,主要从事光电测控技术研究以及光电互感器产品研发。

路电流参数的测量。该方案采用光纤传输作为一、二次测控仪器之间的绝缘隔离,很好地解决了超高压绝缘问题,也为高压输变电测控系统的数字化和智能化奠定了基础。但是,用于高压侧信号采样变送线路要求提供稳定可靠的直流电源。多年来,向 ECT 高压侧信号采样变送线路供能的方法——有源 ECT 的研究,一直是实现 ECT 工程化研发中的技术难题。

对于有源 ECT,国内外都进行了大量研究和工程实践,与无源 ECT 相比,有源 ECT 易于实现产品的高精度和高稳定,并便于标准化和产业化。有关有源 ECT 结构的研究,即以什么方式向 ECT 的高压侧信号采样变送线路提供直流电源,成为 ECT 工程化研发的焦点课题。为此提出了很多种向 ECT“送能”或“取能”方案,并都进行了相关的工程实践,但大多数方案目前只能是一种试验装置。存在的主要问题主要集中在两个方面:一个是供能的成本和可靠性,另一个是使用和维护的方便性。其中一个典型的方案是采用激光“隔离送能”,该方案虽然可以解决源的问题,但造价昂贵,其长期使用的寿命、可靠性也备受质疑^[2,5-7]。

近年来,随着特种导磁材料的出现,使得在交变电磁场中获取理想的能量变得容易起来。加上低功耗信号处理器件的出现,也使得传感电路功耗越来越小(现已降至数毫瓦级),为实现自励源结构的 ECT 铺平了道路。西安华伟光电技术公司经过多年的努力,研制出了完全依靠“自励源”供能方式工作的光隔离电子式电流互感器,并已通过了 IEC 标准的形式实验,其自励源电源供能技术及整机性能指标已经达到了实用要求。

2 自励源电源供能设计方案

根据电磁场储能原理,从高压母线直接获取能量的途径有两种:电场取能和磁场取能。本研究为 ECT 设计的自励源供能方案采用的是磁场取能,其原理见图 2。根据电磁学原理,在取能线圈中存储的能量为:

$$W_m = \frac{1}{2} BHV = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

式中: W_m 为磁场储能; B 为磁感应强度; H 为磁场强度; V 为能线圈包容的体积; L 为能线圈的电感; I 为能线圈中的电流。

图 3 是采用自励源电源供能方式的 ECT 应用全面解决方案的架构示意图。

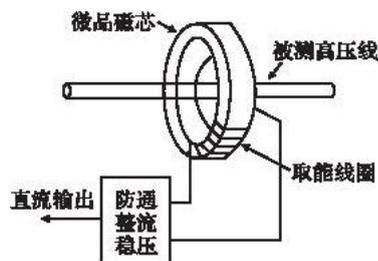


图 2 自励源磁场取能示意图

Fig. 2 Diagram taking energy from magnetic field for self-excitation power supply

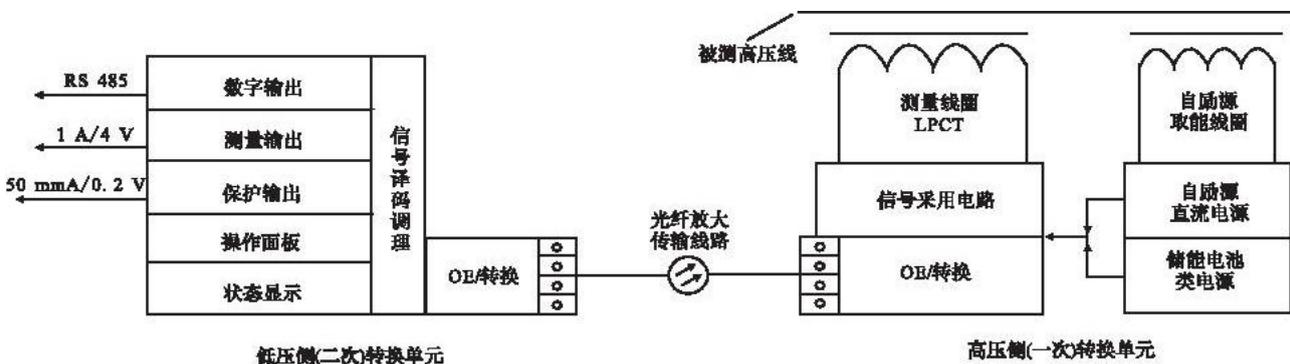


图 3 自励源 ECT 应用全面解决方案

Fig. 3 The comprehensive solution of ECT with self-excitation power supply

3 自励源关键技术

为了真正实现 ECT 的工程化,使其成为高压侧变送电路长期工作稳定、可靠的电源,必须满足 IEC60044-8^[1]标准的相关要求,重要技术指标源有 3 项:它们分别是唤醒电流(Wake-up Current)、唤醒时间(Wake-up time)和饱和大电流(Saturation Large Current)。为此,本研究提出的自励源 ECT 供能设计方案,很好地解决了这些关键技术难题。

3.1 唤醒电流

在 IEC60044-8 标准中有关唤醒电流有明确的定义:使采样变送电路进入工作状态的最小的一次电流为唤醒电流。唤醒电流代表了采样变送电路所能检测到的最小电流,从测量的角度讲,唤醒电流实际是 ECT 测量的灵敏度。因此,尽可能地减小唤醒电流是 ECT 设计追求的重要目标之一。

对于采用自励源的 ECT,激发电流有 2 个方面的意义:其一,激发电流是可测量到的被测高压母线上的最小电流,可称之为标准唤醒电流;其二,若被测高压母线电流过小时,自励源可能将无法取得使 ECT 采样变送电路正常工作的直流电源能量,即,唤醒电流又是保证 ECT 正常工作时的被测高压母线上的最小电流,不妨称之为工作唤醒电流。本研究对唤醒电流关注的重点也主要放在后一项。

根据式(1)可知,决定自励源取能装置的灵敏度的主要参数取决于取能线圈的电感。在被测高压导线上电流(一次电流)和取能线圈的匝数与磁通面积不变的条件下,选用较大的初始磁导率的磁性材料是提高取能线圈电感的唯一有效方法。

通过对多种磁性材料初始磁化曲线的分析比较发现,微晶磁性材料具有比其他磁性材料更大的初始磁导率。所以本研究选用微晶磁性材料用于自励源取能线圈磁芯。

经过大量优化实验研究,当微晶磁材料的导磁截面为 4 cm^2 时,可以做到一次电流只有 0.6 A 条件下,自励源获得 30 mW 以上功率的电源,使 ECT 的标准激发电流也只有几百 mA ,完全满足 IEC 标准与实用的要求。若继续增大取能线圈的导磁截面面积,自励源的取能效果会有相应的提高。但是,在被测的一次电流较大时,取能线圈的导磁截面面积越大,所获得的能量就越多,这将会导致取能线圈输出的大电流冲击自励源的稳压整流电路,严重影响自励源直流电压输出的稳定性。所以,取能线圈的导磁面积并不是越大越好,应在确保自励源取能灵敏度的条件下,取能线圈的导磁面积的大小应适度,一般在 5 cm^2 左右较好。

据统计,大多数被测高压线路即使在空载状态也有 1 A 左右(容性或感性)电流,已满足了自励源所要求的最小电流。也就是说,即使被测高压线路处于空载状态,自励源 ECT 仍能正常工作,无需其他辅助供能措施,采样变送电路可正常输出。本研究开发的自励源 ECT 样机,实测的标准激发电流仅为 0.588 A 。若自励源的取能线圈所采用的微晶磁性材料环的面积为 6 cm^2 ,ECT 的标准激发电流可减小到 0.4 A 甚至更小。

3.2 唤醒时间

在 IEC60044-8 标准中,对唤醒时间有明确的定义:唤醒时间是一次回路(被测高压输变电线路)带电后,测量系统进入工作状态需要的时间。显然,唤醒时间应越短越好。若被测高压输变电线路仅仅是短时间断电(例如断电自动重合闸),由于储能电池/电容连续供电,ECT 将连续工作几分钟到数小时,不存在重唤醒问题。但若被测高压电线路长期不带电,自励源储能耗尽,首次合闸通电后整流稳压过程一般会有 20 ms 以上的延迟,这对于被测高压输变电线路一般的测量和稳态保护影响不大,但对于要求唤醒时间极短的速断保护应用,大于 20 ms 的延迟将是一个缺陷。为此,本研究为被测高压输变电线路断电长达数月的极端情况,采用了掉电/休眠技术,用微型蓄电池维持 ECT 采样变送电路处于节电休眠态,大多数低功耗芯片都具有此功能。本研究开发的 ECT 样机,就利用了电路休眠管理功能,用 60 mAh 的微型蓄电池可维持 ECT 采样变送电路主控芯片守候时间长达 1 年以上(总休眠电流为 $5\text{ }\mu\text{A}$),使采样变送电路由休眠态进入工作状态则仅需几十 ms ,从根本上解决了自励源可能造成 ECT 检测延迟的缺陷,合闸后,蓄电器再充电以备后用。

3.3 饱和大电流

当一次电流增大时,自励源的取能也将快速增加。以至于大大超出需求,这会使后续稳压处理电路造成过热、过压,从而严重损害电子器件的使用寿命。

对于饱和大电流的处理通常有 2 种策略:“放”或“限”。有关“放”的方法在诸多文献中有过介绍和讨论^[2-5,8-10]。但对饱和大电流“放”的相关研究工作,其实验范围仅限于一次电流在 1 000 A 以内,而且要求具有强制散热措施保障,所采用的可控硅和 IGBT 等功率器件都将产生较强的纹波,不仅输出的直流电压不稳,还增加了自励源电源的自耗,使 ECT 很难做到具有较低的唤醒电流。据诸多文献报道,通常仅能达到 $3\text{ A}-10\text{ A}$,留有较大的测量死角。

本研究采用了“限”策略。为此设计了一种特殊的限流组件(DLT-15 组件),接在取能线圈输出端(见图 4)。该组件具有特殊的“漏斗”效应,其功能是:①当取能线圈的电流较小时,DLT-15 组件呈零阻抗通道,即所谓“低通”;②若取能线圈的电流剧增,当大于取能线圈允许电流的上限时,DLT-15 组件的阻抗按指数规律急剧上升,以平抑电流的增加。这就是所谓的“高限”;③由于“高限”必然引起取能线圈的磁饱和,

从而可能产生高压尖脉冲,为此,在 DLT-15 组件的前端并一个电压尖峰吸收模块,使取能线圈的输入端电压峰值限定在 100 V 以内,使“漏斗”(组件 DLT-15)的输出保持小于 10 V/15 mA;④当“漏斗”输出电压高于 10 V,“漏斗”的旁路溢出开关自动打开,向蓄能电池充电。在欠压和一次电流断电情况下,蓄能电池将自动向 ECT 的采样变送电路供电。

根据上述设计思路,并经过反复工程实践,本研究开发的自励源供电系统为 ECT 的信号采样变送电路提供了一个净化的直流电源,这有利于确保 ECT 测量的精度,使系统更加安全、可靠。

由于 DLT-15 组件所呈现的“低通”和“高阻”效应是由较为复杂的非线性无源器件组合实现的。(该技术获国家发明专利:CN1909327,篇幅所限不再赘述。)本研究针对自励源取能线圈中饱和大电流所采取的“限”策略与方法的成功,其“漏斗效应”起了十分关键的作用,图 5 示意了限流“漏斗”的能量分配关系。

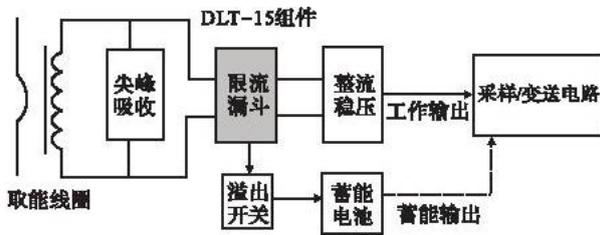


图 4 自励源工作原理图

Fig. 4 Schematic diagram of Self-Excitation Power Supply

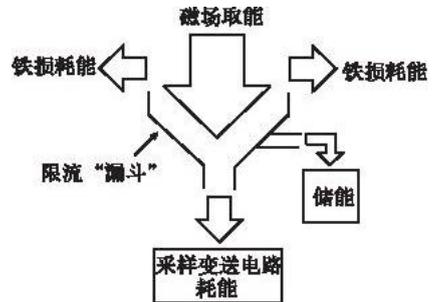


图 5 限流“漏斗”能量分配

Fig. 5 The Energy distribution of funnel structure" restricting electrical current

4 自励源应用效果

依据本研究开发的自励源电子式电流互感器产品已通过国家高压电器质量监督检验中心所作的型式实验,先后在 2 个 110 kV 电站挂装 10 台套,进行了长达 2 年多的试运行,并陆续在我国西北、东北及江南地区作为商品投入运行(室外气候条件:温度: $-30\text{ }^{\circ}\text{C} - +40\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度:10% - 90%)。这种自励源结构的电子式电流互感器,无耗件,免维护,可以连续稳定运行,唤醒电流小于 0.4 A,测量精度 0.1/0.2/5P25,大电流条件下,自励源电路连续温升不超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (无散热器)。自励源供电系统在测量、保护全量程范围自动适应“取、用、储、放”不同工作模式,性能稳定可靠。特别是据挂网站出具的挂网试验报告称:试验样机准确反映了电路上出现的故障大电流,使保护系统做出了正确的判断与动作,表明该型互感器,自励源在短路大电流情况下工作的可靠性。

5 结论

自励源供电系统很好地解决了在高-低压间无电气连接条件下,如何从高压电路上获得稳定可靠的小功率工作电源,从而实现置于高压侧仪表的自行测量,免去了其他外供能方式带来的附加技术条件,因而简化了互感器的绝缘结构,提高了可靠性、稳定性及使用寿命,大大提高了电力系统的综合自动化水平。自励源供电方案的出现,使我国光隔离电子式电流互感器登上了一个新的技术平台,已成业界认可的耐用的高压电器产品进入电力市场。

自励源供电系统高效的磁场取能方式与独特的供电处理系统,已被电力科研科所成功地应用于各种高压实验研究领域、高压绝缘在线监测、雷达高压电源检测等领域,在航空军事等相关应用中也有可能加以借鉴。

参考文献:

- [1] IEC 60044-8 Electronic Current Transformers [S]. 2002.
- [2] 王海明,郑绳植. 电子电流互感器高压侧电源方案研究[J]. 电气应用, 2004, 23(7): 72-74.

- WANG Haiming, ZHENG Shengxuan. Researches on Power Supply for the High Voltage Unit of the Active Electronic Current Transducer [J]. *Electrotechnical Application*, 2004, 23(7): 72-74. (in Chinese)
- [3] 李英英, 朱小梅, 纪 昆, 等. 一种应用于高压侧测量系统中电源[J]. *高电压技术*, 2002, 28(3): 46-47.
LI Fuying, ZHU Xiaomei, JI Kun, et al. The Power Supply of Optoelectric Current Transducer [J]. *High Voltage Engineering*, 2002, 28(3): 46-47. (in Chinese)
- [4] 王政平, 康 崇, 张雪原, 等. 有源型光学电流互感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(10): 34-38.
WANG Zhengping, KANG Chong, ZHANG Xueyuan, et al. Progress in Active Optical Current Transformers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(10): 34-38. (in Chinese)
- [5] 钱 政. 有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J]. *高压电器*, 2004, 40(2): 135-138.
QIAN Zheng. Power Supply for High Voltage Circuit of Active Electronic Current Transformer [J]. *High Voltage Apparatus*, 2004, 40(2): 135-138. (in Chinese)
- [6] 段雄英, 吕 斌, 邱红辉. 高压 ECT 中激光供能电源的设计[J]. *高压电器*, 2006, 42(6): 121-124.
DUAN Xiongying, LÜ Bin, QIU Honghui. Design of Optical Power Supply for High Voltage ECT [J]. *High Voltage Apparatus*, 2006, 42(6): 121-124. (in Chinese)
- [7] 张 曦, 张庆伟, 张源斌. 混合式 OCT 高压侧电路的供电方式[J]. *高电压技术*, 2002, 28(12): 87-90.
ZHANG Xi, ZHANG Qingwei, ZHANG Yuanbin. Solutions of Power Supplies for High Voltage Circuit of Hybrid Current Transformer [J]. *High Voltage Engineering*, 2002, 28(12): 14-15, 35. (in Chinese)
- [8] 颜 研, 张 涛, 罗承沐, 等. 一种混合式光电电流互感器的电子电路[J]. *变压器*, 2001, 38(11): 33-36.
YAN Yan, ZHANG Tao, LUO Chengmu, et al. Circuit of Hybrid Optical Current Transformer [J]. *Transformer*, 2001, 38(11): 33-36. (in Chinese)
- [9] 邱红辉, 段雄英, 邹积岩. 基于 LPCT 的激光供能电子式电流互感器[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(4): 109-112.
QIU Honghui, DUAN Xiongying, ZOU Jiyuan. A Laser Powered Electronic Current Transformer Based on LPCT [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society* [J]. 2008, 23(4): 109-112. (in Chinese)
- [10] 刘忠战. 电子式电流互感器高压侧自励源供能方法研究[J]. *高压电器*, 2006, 42(1): 127-130.
LIU Zhongzhan. Research on Self-excitation Power Supply from High Voltage Side of Electronic Current Transformers [J]. *High Voltage Apparatus*, 2006, 42(1): 127-130. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

The Research and Application on System of Self-Excitation Power Supply

MO Wei-dong¹, LIU Zhong-Zhan²

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Xi'an Huawei Optic Electric Technology Co. Ltd, Xi'an, 710118, China)

Abstract: The paper introduces a principle and application of power supply that gets energy from high tension line for electronic current transformers (ECT). Some problems of designing the new type of active ECT with self-excitation power supply and the relevant techniques and methods are fully studied. The ECT with self-excitation power supply has successfully created and put into practical. The wake-up current of the new ECT is only 0.588 A and Wake-up time is less than 20 ms. The original restricting electrical current "funnel structure" (a special restricting current component) is used to have solved key technology problems of impacting system by saturation large current. With some other special technical measures, self-excitation power supply can make sampling and transmitting circuit work in the purifying power and ensure measurement accuracy. The whole technology of creating the ECT with self-excitation power supply not only has simplified the structure of the ECT and also has achieved a major breakthrough in optical isolation ECT technology of china, that greatly lift the integrated automation level of power system. The new type of ECT has been approbated durable products and has entered the electric power market.

Keys words: ECT; take energy from magnetic field; self-excitation power supply