

35 kV 电子式电流互感器的研究

杨 洪¹, 方春恩¹, 任 晓¹, 董恩源², 李 伟¹, 王 军¹, 侯祥玉³

(1. 西华大学电气信息学院, 成都 610039; 2. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 大连 116024;

3. 四川泰克电器有限公司, 成都 611733)

摘要: 基于小铁心电流传感器 LPCT 和空心线圈原理的 35 kV 电子式电流互感器具有测量精度高、动态范围宽等优点, 与传统的电磁式电流互感器相比有着明显的优势。文中分析了 35 kV 电子式电流互感器的测量用 LPCT 传感器和保护用 PCB 空心线圈电流传感器的工作原理及影响电子式电流互感器测量准确度的主要因素; 采用有限元法对电子式电流互感器的电场进行仿真计算, 优化了互感器的电场结构。在理论分析基础上, 研制了一台 35 kV 电子式电流互感器, 给出了准确度测试。测试结果表明, 设计的 35 kV 电子式电流互感器符合 GB/T 20840.8—2007 要求, 满足电力系统测量准确度 0.2 级和保护准确度 5P 要求。

关键词: 电子式电流互感器; 电场; 准确度**中图分类号:** TM452**文献标志码:** A**文章编号:** 1001-1609(2011)02-0012-05

Research of 35 kV Electronic Current Transformer

YANG Hong¹, FANG Chun-en¹, REN Xiao¹, DONG En-yuan²,LI Wei¹, WANG Jun¹, HOU Xiang-yu³

(1. Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Sichuan Taike Electric Apparatus Corporation, Chengdu 611733, China)

Abstract: The 35 kV electronic current transformer based on low power instrument transducer LPCT and air core coil has some performances such as high accuracy and wider dynamic range, in which it shows obvious advantages over the traditional current transformer of the inductive type. In this paper, the principle of the 35 kV electronic current transformer and the influence factors on the transformer's accuracy were analyzed in detail. And the electrical field of the electronic current transformer was simulated by a FEM and the electric field has been optimized. A 35 kV electronic current transformer has been developed and tested. The accuracy test results showed that the transformer could satisfy the requirement of GB/T 20840.8—2007 and the measurement accuracy could reach class 0.2/5P.

Key words: ECT; electric field; accuracy

0 引言

电流互感器是电力系统中用于继电保护、电能计量和系统监控的重要设备, 其准确度和可靠性对电力系统的安全、可靠运行至关重要。传统的电流互感器主要基于法拉第电磁感应原理, 其主要优点

是性能稳定, 具有成熟的运行经验。但是随着电力系统的发展, 微机保护、电气设备自动化程度及电力系统绝缘等级的提高, 传统的电磁式电流互感器因自身传感机理局限而呈现出种种难以克服的问题, 已不能满足电力系统自动化、数字化的发展要求。另一方面, 随着微机继电保护技术和现代微电子技术应用, 继电保护和二次测量装置不再需要大

收稿日期: 2010-11-09; 修回日期: 2010-12-27

基金项目: 智能电气设备重点实验室项目(XZD0819); 四川电力电子重点学科项目(SZD0503)和国家自然科学基金(50807006)。

Project Supported by the Intelligent Electrical Equipment Key Laboratory Project (XZD0819), Sichuan Provincial Key Subject Program (SZD0503), National Natural Science Foundation of China (50807006).

功率驱动,传统的电流互感器二次输出的 5 A 或 1 A 电流信号不能直接和微机测量保护装置接口,难以适应电力系统自动化、数字化和智能化的发展趋势^[1-4]。针对上述问题,新型电子式电流互感器成为了国内外研究重点。

笔者研制的互感器是基于低功率电流互感器和空心线圈为传感头的电子式电流互感器^[5],实现电力系统电流计量和保护功能。设计的 35 kV 电子式电流互感器原理结构见图 1。

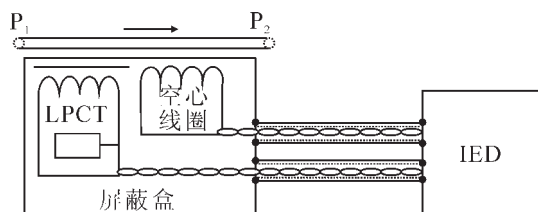


图 1 35 kV 电子式电流互感器原理图

Fig.1 Structure diagram of 35 kV electronic current transformer

笔者在对 35 kV 电子式电流互感器的原理、结构详细分析的基础上,采用 Maxwell 有限元方法对互感器的电场分布进行计算和绝缘设计。设计和制作了一台 35 kV 电子式电流互感器样机,并对样机进行了绝缘性能和准确度测试,测试结果表明,样机满足 GB/T 20840.8—2007 标准要求,准确度可达 0.2 级测量和 5P20 保护要求。

1 结构和原理

1.1 测量用互感器 LPCT 原理

LPCT 是一种低功率输出特性的电磁式电流互感器,在 GB/T 20840.8—2007 中 LPCT 被列为电子式电流互感器的一种实现形式,代表着电磁式电流互感器的一个发展方向,具有广阔的应用前景。由于 LPCT 的输出一般是直接提供给电子电路,二次负载比较小,其铁心一般采用超微晶合金等高导磁性材料,在较小的铁心截面下,就能够满足测量准确度的要求。LPCT 主要由小铁心电流互感器 CT、取样电阻 R_s 和信号传输单元组成。一次母线电流 I_p 被转换为二次小电流 I_s ,取样电阻 R_s 将二次电流转换为正比于一次电流的小电压信号输出;信号传输单元由双层屏蔽绞线和连接端子构成,主要将互感器输出电压信号传递到智能电子设备,同时实现外界电磁场屏蔽功能。

根据原理,测量用的 LPCT 的输出为

$$U_s = \frac{N_1}{N_2} I_p R_s \quad (1)$$

测量用的 LPCT 的额定变比 k_r 为

$$k_r = \frac{I_p}{U_s} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{1}{R_s} \quad (2)$$

测量用电流互感器的比差 ε 为

$$\varepsilon = \frac{k_r \cdot U_s - I_p}{I_p} \times 100\% \quad (3)$$

式(1)~(3)中: U_s 为 ECT 二次侧输出电压; I_p 为一次母线电流; R_s 为二次侧取样电阻; N_1 为一次绕组匝数; N_2 为二次绕组匝数。

由式(1)~(3)可知,一旦一次和二次绕组匝数确定,比差的变化范围就取决于取样电阻的精度和温度系数。笔者设计的 LPCT 铁心材料为超微晶合金,变比为 800:1,LPCT 的取样电阻阻值为温度系数小于 1.0×10^{-5} 。额定一次电流为 800 A,在一次额定电流时,二次额定输出电压为 1 V。

1.2 保护用电流互感器的结构和原理

35 kV 电子式电流互感器采用空心线圈实现保护用一次电流测量。空心线圈电流互感器与其他测量原理相比,具有不含铁心、频带宽、线性度好、测量范围宽、造价低、体积小、重量轻等优点,并且没有饱和与磁滞现象^[6-7]。通常空心线圈是将软导线(一般为漆包线)均匀紧密绕在非磁性骨架上构成,空心线圈结构图见图 2。

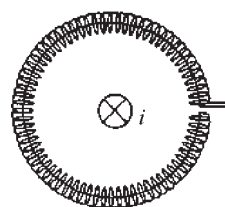


图 2 空心线圈结构图

Fig.2 Structure diagram of rogowski coils

在利用空心线圈测量电流时,将载流导体穿过线圈中心,线圈所交链的磁链与被测电流成线性关系。根据安培环路电流定律,磁场强度 H 沿任意封闭轮廓积分等于穿过该封闭轮廓所限定面的电流。当负荷为高阻抗时,线圈的输出电压是穿过线圈的一次电流 i 的函数。对圆环形骨架且为矩形截面的线圈输出电压满足关系

$$e(t) = -\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{di}{dt} \quad (4)$$

式(4)中: N 为空心线圈匝数; r 为线圈平均半径; μ_0 为真空中磁导率; R_1 为线圈内径; R_2 为线圈外径; h 为线圈骨架高度。式(4)是在线圈均匀绕制和每匝线圈横截面相等条件下推导出来的。对于一般的空心线圈,很难满足上述条件,从而在工业生产中参数一致性很难得到保证,影响空心线圈测量电流时的特性。

为了克服上述困难,采用印制电路板(PCB)设计空心线圈,可通过计算机辅助设计将印制导线均匀布置在印制电路板上,数字加工技术能保证每匝线圈的横截面积相等。PCB 空心线圈简易结构图见图 3。从图 3 中可看到,在 PCB 的顶层和底层均匀放置导线,并且两层之间由过孔连接导通。为了消除外界磁场对互感器的影响,可将 2 个绕向相反的线圈进行串联,实现普通空心线圈常用回线方式来抵消纵向磁场的功能,同时可增大线圈输出电压 $e(t)$ 。

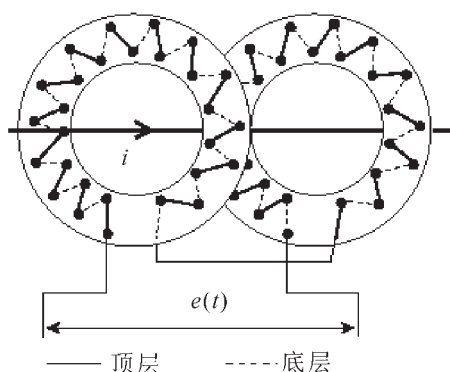


图 3 PCB 线圈结构图

Fig.3 Structure diagram of PCB coils

笔者设计的空心线圈为 PCB 板,材料为 FR4, PCB 的设计参数见表 1。一次母线直径为 28 mm 圆铜棒,屏蔽盒内半径为 44.5 mm,屏蔽盒为非导磁材料不锈钢,绝缘距离 d 为 30 mm,35 kV 互感器长期稳定运行条件下环氧树脂的绝缘耐受强度为 3~5 kV/mm。显然,该 ECT 的绝缘距离能满足 35 kV ECT 长期稳定运行的绝缘要求。该 ECT 保护用电流互感器用表 1 所示参数的 6 张 PCB 板串联焊接而成,就可满足额定一次电流为 800 A 保护用电感器的要求,当一次施加额定电流 800 A 时,二次输出大约为 150 mV 的感应电动势(二次设计输出为 150 mV)。

表 1 PCB 板设计参数

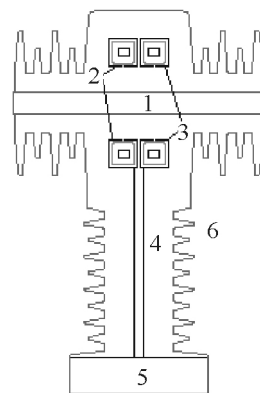
Tab.1 Design parameters of PCB board

名称	内半径 /mm	外半径 /mm	厚度 /mm	匝数 N
参数	50	80	3.5	500

2 ECT 模型建立和分析

2.1 模型的建立

利用有限元分析软件包 Maxwell 建立电子式电流互感器的有限元 2D 模型^[8-9],见图 4。



1—一次母线; 2—LPCT 线圈; 3—空心线圈;
4—二次线出线管; 5—接地端; 6—环氧树脂。

图 4 电子电流互感器二维结构图

Fig.4 Two-dimensional structure of electronic current transformer

2.2 指定材料属性

所建 ECT 模型指定材料属性见表 2。

表 2 ECT 材料属性

Tab.2 Material properties of ECT

材料名称	铜	环氧树脂	空气	FR4	不锈钢
介电常数	1	3.9	1.000 6	4.4	1
电导率/(S·m ⁻¹)	5.8×10^7	1×10^{-13}	0	0	1.1×10^6

2.3 指定源和边界条件

考虑实际运行条件,在离场源足够远处,可以认为电场矢量为零,所以在计算中采用扩大电场计算区域的方法解决场域不封闭的问题。在此指定边界条件和激励源见表 3。

表 3 ECT 源/边界条件

Tab.3 Source / boundary conditions of ECT

名称	一次 母线	屏蔽盒	接地端	不同材料 交界面
源/边界条件	电源	零边界条件	零边界条件	自然边界

没有指定材料属性的材料交界面,软件自动指定自然边界条件,满足以下关系

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (5)$$

$$D_{n1} = D_{n2} + \rho_s \quad (6)$$

式(5)、(6)中: E_t 为分界面处电场强度的切向分量; D_n 为分界面处电通密度的法向分量; ρ_s 为表面电荷密度。

式(5)和式(6)表明,物体之间的界面电场强度的切向分量连续,电通密度 D_n 的法向分量之差为表面电荷密度 ρ_s 。

2.4 电场计算及优化

通过电子式电流互感器模型的建立、指定材料属性、激励源、边界条件及静电场自适应求解分析,

然后通过后处理器的计算器可找到电场强度最大值的位置及最大值,最大值的位置在距一次母线最近的屏蔽盒棱角位置。为了减小电场强度的最大值,以利于满足 ECT 的绝缘要求,下面就两种方案进行分析:方案 1 屏蔽盒棱角不倒圆,方案 2 对屏蔽盒棱角进行倒圆角处理,倒角半径为 2 mm。两种方案的电场计算结果见表 4。

表 4 两种方案电场计算结果比较

Tab.4 Comparison of two electric field calculation program

名称	方案 1			方案 2		
施加电压/kV	35	95	185	35	95	185
$E_{\max}/(\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1})$	3.398	9.223	17.960	2.378	7.309	14.233

从表 4 可知,在工频耐受电压和雷电冲击电压下,两种方案的最大电场强度都小于环氧树脂的击穿电场强度 24~28 kV/mm。

雷电冲击电压作用下,电场场度幅值云图见图 5。

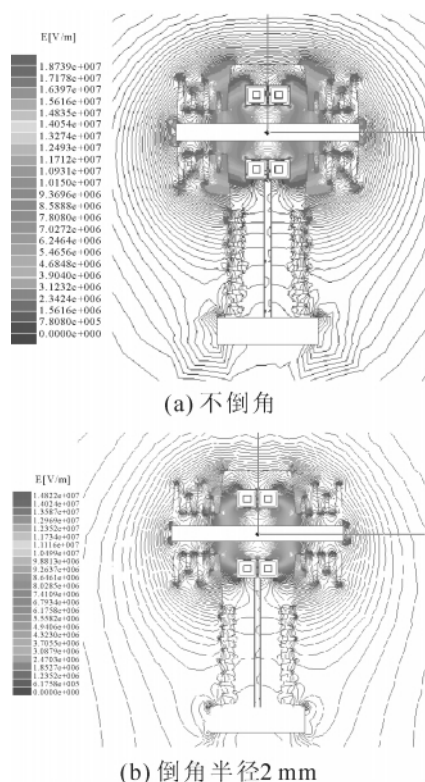


图 5 ECT 在雷电冲击电压下电场强度幅值云图

Fig.5 Amplitude cloud of the electric field strength of ECT in the lightning impulse voltage

从图 5 可知,屏蔽盒倒角与不倒角其最大电场强度都发生在介质与屏蔽盒的交界面位置,但倒角后最大电场强度明显下降,电场强度分布更均匀。

由于环氧树脂配方和互感器浇注工艺的不同,环氧树脂浇注件的长期允许运行电场强度有一定的范围,为 3~5 kV/mm,且电场强度对绝缘材料的电老化速度有显著影响,绝缘材料的电老化寿命与

介电常数的幂函数成反比关系^[10-11],因而在额定工作电压下方案 1 更切实可行,在制作样机时,按方案 2 对屏蔽盒进行倒角处理,以满足样机的绝缘及长期运行的寿命要求。

3 样机性能测试

包括绝缘性能测试和准确度测试^[5,12-14]。

3.1 绝缘特性测试

为了考核设计的 ECT 的绝缘特性是否满足 GB/T 20840.8—2007 要求,进行下列绝缘性能测试。

1)工频耐受电压测试。在 ECT 的一次接线端子与地之间施加 95 kV 的工频试验电压,持续 60 s,未发生击穿或闪络,样机的内绝缘合格。

2)局部放电测量。在工频耐压试验之后不间断地降压到规定的局部放电测量电压 28.1 kV 时,测量放电量为 8 pC,满足 ≤ 20 pC 的要求。

3)雷电冲击电压测试。对 ECT 样机施加 185 kV 雷电冲击全波试验电压正、负极性各 15 次,通过。表明样机外绝缘合格。

对 ECT 样机进行绝缘性能测试,均满足绝缘性能要求,从而验证了 Maxwell 电场仿真的有效性。

3.2 准确度测试

设计制作 35 kV 电子式电流互感器样机,二次额定输出电压为 1 V 和 150 mV,测量部分的准确级为 0.2 级,保护部分的准确级为 5P。样机准确度测试系统见图 6。

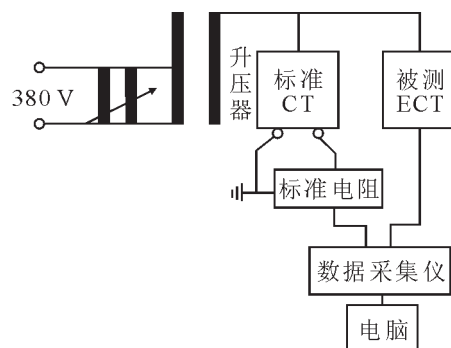


图 6 35 kV 电子式电流互感器测试系统

Fig.6 The calibration system of 35 kV ECT

用 0.002 级的标准电阻采集标准电流互感器的二次输出信号,由数据采集仪对标准电流互感器和被测 ECT 输出进行同步采样、存储、计算、比较最后得出比差、角差等信息,所得试验结果见表 5。

准确度测试结果表明,对于测量部分 $5\% \sim 120\% I_{Pr}$,比差 $< 0.1\%$,角差 $\leq 5'$;对于保护部分在 $100\% I_{Pr}$ 处,比差 $< 0.5\%$,角差 $< 10'$,设计的电子式电压互感器的比差和角差均满足 GB/T 20840.8—2007 的 0.2 级测量和 5P 保护级要求。

表 5 35 kV ECT 准确度试验结果

Tab.5 Accuracy test results of 35 kV ECT

类别	测试点 (U_r) /%	比差 /%	角差 / (°)
测量级	5	-0.043	4.0
	20	-0.020	2.2
	100	-0.004	1.3
	120	0.004	0.6
保护级	100	0.304	3.0

4 结论

1) 通过电场有限元分析方法可优化互感器的结构和绝缘性能设计, 并为互感器样机制作提供理论依据。

2) 通过对棱角倒圆方式, 可减小棱角集中电荷数量, 改善电场分布极不均匀的情况, 从而达到降低此处最大电场强度目的, 以利于提高 ECT 绝缘材料的寿命。

3) 实现了一种集测量和保护一体的双用途电子式电流互感器, 测试表明在正常使用条件下, 其准确度满足 GB/T 20840.8—2007 的测量 0.2 级和保护 5P20 的要求。

参考文献:

- [1] NISHIYAMA E, KUWANAMI K, KAWANO M, et al. Electronic instrument transformers for integrated substation systems [C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific: [s.n.], 2002: 459-464.
- [2] SAITOH M, KISHIMOTO K, KOSAKADA M. Development of the electronic instrument transformers for intelligent substation[J]. TMT&D Review, 2003(1): 1-6.
- [3] GROSS R, HERRMANN J, WACHE M, et al. Substation control and protection systems for novel sensors [C]//International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Pairs, France, 2002: 1-9.
- [4] 方春恩, 李伟, 王佳颖, 等. 基于电阻分压的 10 kV 电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 58-63.
FANG Chun-en, LI Wei, WANG Jia-ying, et al. 10 kV electronic voltage transformer based on resistor divider[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 58-63.
- [5] 中国国家标准委员会. GB/T 20840.8—2007. 互感器 第 8 部分: 电子式电流互感器[S]. 中国标准出版社, 2007.
China National Standards Committee. GB/T 20840.8—2007. Transformers part 8: electronic current transformers [S]. Standards Press of China, 2007.
- [6] 邹积岩, 段雄英, 张铁. 罗柯夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 81-83.

ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, ZHANG Tie. The simulating calculation and experimental research of rogowski coil for current measurement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 81-93.

- [7] 廖京生, 郭晓华, 朱明均, 等. 用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 56-58.
LIAO Jing-sheng, GUO Xiao-hua, ZHU Ming-jun, et al. Rogowski coil current transducer for low amplitude current measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 56-58.
- [8] 张榴晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996: 62-64.
ZHANG Liu-chen, XU Song. Finite element method in electromagnetic computation [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1996: 62-64.
- [9] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
LIU Guo-qiang, ZHAO Ling-zhi, JIANG Ji-ya. Engineering finite element analysis[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.
- [10] 孙红艳, 曹云东, 陈毅. 35 kV 电流互感器电场分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(1): 37-40.
SUN Hong-yan, CAO Yun-dong, CHEN Yi. Electric field analysis of 35 kV current transformer[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28(1): 37-40.
- [11] 彭韬, 张广泰, 石亲民, 等. 35 kV 电子式电流互感器三维电场分析[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(8 增刊): 50-51.
PENG Tao, ZHANG Guang-tai, SHI Qin-min, et al. Analysis of three-dimensional electric field of electronic current transformer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(8 Supplement): 50-51.
- [12] 中国国家标准委员会. GB 1208—2006. 电流互感器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
China National Standards Committee. GB 1208—2006. Current transformers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] 中国国家标准委员会. GB 311.1—1997. 高压输变电设备的绝缘配合[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
China National Standards Committee. GB 311.1—1997. High-voltage transmission and distribution equipment insulation coordination [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [14] 肖耀荣, 高祖锦. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳: 辽宁科学出版社, 2003: 115-117.
XIAO Yao-rong, GAO Zu-jin. Transformer principles and design basis[M]. Shenyang: Liaoning Science Press, 2003: 115-117.

杨洪(1972—), 男, 讲师, 研究方向为电子式互感器理论及应用研究。