

用于交流特高压并联电容器组的小变比油浸式 电流互感器研制

杨茜, 刘水平, 周浪, 杨硕亮, 李宇, 江世伟

(西安西电电力电容有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 在电力系统中, 电流互感器主要用于电流测量、电能计量, 与继电器配合对系统和设备进行过电流、过负荷保护。本文提出了一种特殊小变比电流互感器的设计方法, 该方法能够满足小变比电流互感器的性能要求, 并给出了设计实例, 符合国家标准, 满足工程要求。

关键词: 电流互感器; 并联电容器组; 油纸绝缘; 准确级; 小变比

Development of Small Transformation Ratio Oil-immersed Current Transformer for AC UHV Shunt Capacitor Bank

YANG Qian, LIU Shuiping, ZHOU Lang, YANG Shuoliang, LI Yu, JIANG Shiwei

(China XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: Current transformer in power system is mainly used for current measurement, electric energy metering and, in cooperation with the relay, for protection of over current and over load of system and equipment. In this paper, the design method of current transformer with special small transformation ratio is proposed, which can meet the performance requirements of current transformer with small transformation ratio. Moreover, the design examples meeting China National Standards and projects requirements is given.

Keywords: current transformer; shunt capacitor bank; oil-immersed paper insulation; accuracy class; small transformation ratio

0 引言

在电力系统当中, 电流互感器主要作用是将一次线路上的大电流转变为二次的小电流, 供电流测量、电能计量和继电保护装置使用^[1]。电流互感器绝缘介质分为干式、充气式、环氧树脂浇注式和油浸式等, 额定电压 10 kV 及以下常采用干式和浇注式产品, 35 kV 及以上常采用充气式和油浸式。额定电流在 75 A 以下的电流互感器为小变比电流互感器, 主要用于电容器成套装置中作不平衡保护用。不平衡保护回路中电流值较小, 故障短路电流和高频涌放电流较大, 需采用特殊小变比电流互感器。

1 主要参数及技术难点

文中设计的小变比电流互感器用于交流特高压并联电容器组的双桥差电流保护用, 绝缘方式采

用油浸式, 不平衡保护回路电流互感器中流过不平衡电流 ΔI , 通过检测 ΔI , 实现对电容器组的保护双桥式差电流保护方式, 可以有效避免继电保护误动作^[2], 提高装置的运行质量, 保护回路见图 1, 其中 TA 为电流互感器。技术参数见表 1。

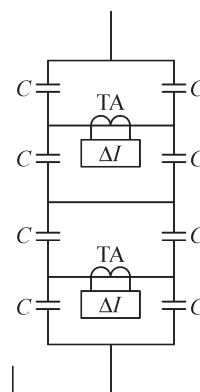


图1 双桥式差电流保护回路
Fig. 1 Double bridge differential current protection circuit

表1 技术参数
Table 1 Technical parameters

项目	设计参数
型号	LB-145
额定一次电压/kV	145
额定一次电流/A	2
额定二次电流/A	1
变比	2/1
准确级	0.2
额定输出/VA	5
功率因数 $\cos\varphi$	0.8
一次绕组对地工频耐压/kV	275
热稳定电流/(kA/s)	1
动稳定电流/kA	2.5

根据以上参数可以进行铁心截面积和绕组匝数设计,电流互感器匝数是设计的关键因素之一^[3],直接影响产品性能。首先需确定一次绕组和二次绕组的匝数,再选择一次绕组导体和二次绕组导线规格,确定一次绕组的直径、导电截面积及材质,再根据一次绕组绝缘包扎后的直径,设计铁心内径与截面积^[4]。电流互感器测量精度取决于匝数和铁心截面的大小,增加匝数或增大铁心的截面积,能有效地提高测量精度。本次设计的一次额定电流只有2 A,一次匝数不能取常规1匝或2匝,需增加匝数,但过多增加一次匝数,会使一次绕组直径变大,一次绕组直径根据产品绝缘进行设计在一定范围内,如果减小一次绕组导电截面积,又会降低产品的动、热稳定性能,所以设计时需同时满足以上几点要求,解决关键是在确定合理匝数的前提下,设计铁心截面积和一次绕组导电截面积,保证产品动、热稳定性能和绝缘性能^[5-6]。

2 一、二次绕组设计

2.1 一次绕组设计

常规电流互感器一次匝数为1匝或2匝,一次绕组材质常采用铜扁线或铝管。本次设计一次匝数较多,绕组材质采用聚四氟乙烯电缆线,聚四氟乙烯具有耐高低温、耐腐蚀、高绝缘特性,线芯材质为铜^[7],作为一次绕组容易加工成多匝数。

电流互感器长期运行在额定一次电流下,需同时满足以下要求^[8]:

- 1) 额定一次电流下的电流密度不大于1.5 A/mm²;
- 2) 额定短时热稳定电流密度不大于160 A/mm²。

2.2 动、热稳定性计算

电流互感器一次绕组通过系统短路电流,将产

生很大电磁力冲击产品,可能使产品损坏^[8]。本次设计的小变比电流互感器,从材料选择上和结构的设计上与普通电流互感器相比做了改进,一次绕组为双“R”型结构,一次绕组通过系统短路电流时,其电磁力为

$$F = f_c(\text{环部电磁力}) + f(\text{直线部电磁力}) =$$

$$\frac{1}{2}(IN)_1^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0.75 \right) \times 10^{-7} + (IN)_1^2 \frac{L}{a} \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{L^2}} - \frac{a}{L} \right) \times 10^{-7}$$

式中: $(IN)_1$ 为一次匝数; R 为环部内圆半径; r 为一次绕组截面半径; a 为两直线部中心距; L 为两直线部长。

根据以往产品设计经验,如果提高一次匝数来提高精度,势必带来较大的电磁力。在进行结构设计时,结构的机械强度应留有足够余量,在保证机械强度同时合理增加一次绕组匝数,同时还应考虑一次导体支持零部件的强度,本次设计在一次导体聚四氟乙烯电缆线尾端连接高压端部分增加铜扁线衔接,保证一次导体与一次导电杆可靠连接,增加导体支持零部件强度^[9-10]。一次绕组结构见图2,一次绕组直线部分,采用无纬带捆扎固定增加强度,整体采用1 mm绝缘纸板仿形配垫成圆形,方便绝缘包绕。

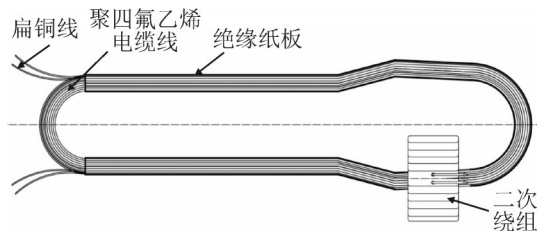


图2 一次绕组结构
Fig. 2 Primary winding structure

本次设计采用双根4 mm²聚四氟乙烯电缆线作一次绕组,一次匝数为100匝。

一次绕组的截面积为: $2 \times 4 = 8 \text{ mm}^2$

额定一次电流密度为: $\rho = \frac{2}{8} = 0.25 \text{ A/mm}^2$

额定短时热稳定电流密度: $\delta_{ts} = \frac{1000}{2 \times 4} = 125 \text{ A/mm}^2$

由上式计算可见,根据热稳定电流下,铜导体的最大电流密度不大于160 A/mm²的设计原则,一次绕组的导线截面完全能满足电流密度和热稳定要求。

2.3 二次绕组设计

目前电流互感器测量级大多采用0.2级,0.2级误差范围在5%~120%负荷范围内,在20%额定一次电流下的误差不大于±0.2%,相位差不大于±10'^[11],误差要求见表2。

表2 测量用电流互感器的比值差和相位差限值(0.1~1级)
Table 2 Ratio difference and phase difference limits for measuring current transformer (0.1~1 class)

准确级	额定电流百分数下的				额定电流百分数下的相位差							
	比值差 ±%				±(')				±crad			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9
1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60	5.4	2.7	1.8	1.8

电流互感器铁心材料常用有硅钢片、坡莫合金和超微晶合金^[12-13],其磁化曲线见图3,基本数据见表3,超微晶合金与坡莫合金的初始导磁率和最大导磁率数值接近,硅钢片较低。

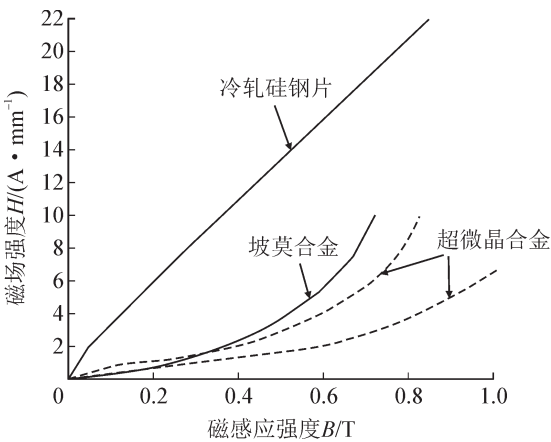


图3 磁化曲线
Fig. 3 Magnetization curve

表3 电流互感器常用软磁材料基本参数比较
Fig. 3 Comparison of basic parameters of soft magnetic materials for current transformer

基本参数	超微晶合金	坡莫合金	硅钢片
饱和磁感应强度 B/T	1.25	0.75	2.0
初始磁导率	(4~8)×10 ⁴	(5~8)×10 ⁴	1×10 ³
最大磁导率/(H·mm ⁻¹)	60×10 ⁴	60×10 ⁴	4×10 ³
居里温度/°C	570	400	740
d/(g·cm ⁻³)	7.2	8.75	7.65
叠片系数	0.7	0.85	0.95
厚度/mm	0.03	0.15	0.3

相同铁心规格,图4中控制误差为GB 20840.2—2014 要求值。采用3种不同材料误差计算结果见图4。从计算结果可以看出,0.2 铁心材料用普通的硅钢片远远无法满足精度要求,只有坡莫合金和超微晶合金满足精度要求^[14]。超微晶合金密度与坡莫合金相差很大,因此,同样的铁心尺寸,坡莫合金铁心重量比超微晶合金更重,坡莫合金的价格比超微晶合金价格高,从产品成本考虑,选用超微晶合金材料更合适^[15-16]。

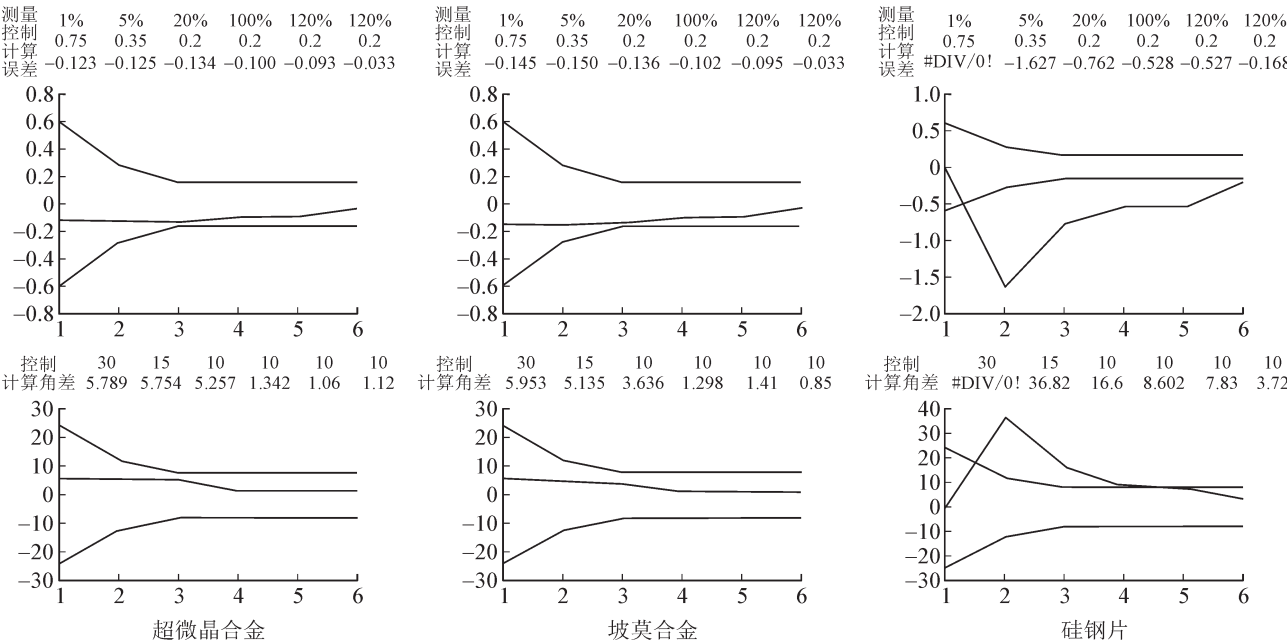


图4 不同材料误差计算结果
Fig. 4 Error calculation results of different materials

二次线规格选 QQ-2 漆包圆铜线 $\Phi 2.12$ 和 $\Phi 1.06$ 双根并绕,便于实现 $\Phi 1.06$ 退一匝进行误差补偿。

漆包线截面积: $S_2 = \frac{2.12^2 + 1.06^2}{4} \times \pi = 4.41 \text{ cm}^2$

电流密度: $J_2 = \frac{1.2}{4.41} = 0.272 \text{ A/mm}^2$

3 绝缘结构设计

本次设计电流互感器采用电容型油纸绝缘结构^[16],通过一组电容屏串联来达到分压的目的,绝缘结构见图 5,将靠近一次绕组的电容屏与一次导体连接,最外层的电容屏接地,这样就构成接在高压与地电位之间的一组串联电容器^[17]。

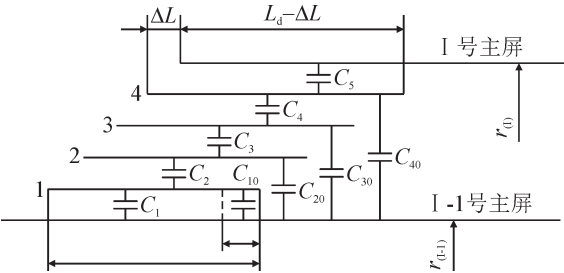


图5 电容型绝缘结构
Fig. 5 Capacitive insulation structure

先计算出各相邻主电屏间绝缘层的电容量 C_n ,再计算分配到各主屏的电压 U_n 以及径向、轴向场强 E_m 、 E_{ln} 。

1)各绝缘层的电容量: $C_n = \frac{0.4L_n}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}$

表4 产品误差试验数值
Table 4 Error test value of product

出线端子及准确度	额定电流/%	负荷/VA	电流误差 f /%	相位差 δ /($^\circ$)	负荷/VA	电流误差 f /%	相位差 δ /($^\circ$)
1S ₁ 1S ₂ 0.2	5	5	-0.115	5.7	1.25	-0.061	3.9
	20	5	-0.124	5.2	1.25	-0.069	3.4
	100	5	-0.100	1.3	1.25	-0.045	1.86
	120	5	-0.082	1.06	1.25	-0.023	1.12

5 结语

经过以上设计,小变比电流互感器采用聚四氟乙烯电缆线作为一次导体,实现一次绕组多匝数设计,提高匝数比,解决了小变比 2/1 测量难题,各项计算结果符合国标要求,产品耐压试验、误差试验、局放试验、介损试验等通过试验验证,各项性能满足交流特高压工程并联电容器组的双桥差电流保护用工程要求。

参考文献

[1] 肖耀荣,高祖绵. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳:辽宁

2)总电容: $C_0 = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_n}}$

3)各绝缘层分到的电压: $U_n = \frac{C_0}{C_n} U$

4)各绝缘层的径向场强: $E_m = \frac{U_n - U_{n-1}}{r_{n-1} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}$

5)各绝缘层的轴向场强: $E_{ln} = \frac{U_n - U_{n-1}}{\Delta L_n}$

本次设计产品一次绕组对地工频耐压为 275 kV,总绝缘厚度 35 mm,在绝缘层中设计 7 个主电容屏,每两个主屏之间设计 4 个端屏,在最大工作电压 145 kV 下,径向平均场强控制在不大于 3 kV/mm,轴向平均场强控制在不大于 0.2 kV/mm,在一次绕组对地工频耐压 275 kV 电压下,径向平均场强控制在不大于 12 kV/mm,轴向平均场强控制在不大于 0.4 kV/mm 时,本方案设计一次绕组绝缘利用率高,电场强度设计合理^[18-20],保证了产品运行可靠性。

4 误差试验验证

产品在绝缘试验、局部放电试验和介质损耗因数测量试验合格后,对产品误差进行验证,试验数值见表 4,数值完全满足准确级 0.2 级要求,可达到最高精度 0.2 S 级要求,精准测量回路中电流值,保证电容器组运行质量。

科学技术出版社,2003.
[2] 刘水平. 输变电装备关键技术与应用丛书 互感器电力电容器[M]. 北京:中国电力出版社,2020.
[3] 周英姿,贾峰,季慧玉. 高精度测量用铁心电流互感器的设计与仿真[J]. 电器与能效管理技术. 2022(1):47-50.
ZHOU Yingzi, JIA Feng, JI Huiyu. Design and simulation of iron core current transformer for high precision measurement[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology. 2022(1):47-50.
[4] 王乐仁,杜汉玉,陈文中. 电流互感器误差仿真的应用及其限制[J]. 高电压技术,2002(8):31-37.
WANG Leren, DU Hanyu, CHEN Wenzhong. Application

- and limitation of error simulation of current transformer[J]. High Voltage Technology, 2002(8):31-37.
- [5] 郭胜,郝桃武. 提高电流互感器动热稳定性能的措施[J]. 湖南电力, 2021(3):69-72.
- GUO Sheng, HAO Taowu. Measures to improve dynamic thermal stability of current transformer[J]. Hunan Electric Power, 2021(3):69-72.
- [6] 唐铭华. 电流互感器的动热稳定性[J]. 电机电器技术, 1989(4):35-39.
- TANG Minghua. Dynamic thermal stability of current transformer[J]. Electric Machinery and Electrical Apparatus Technology, 1989(4):35-39.
- [7] 马显映,刘小状,陈小松. 电流互感器磁饱和特性对继电保护的影响及防范[J]. 电工技术, 2023(22):190-192.
- MA Xianying, LIU Xiaozhuang, CHEN Xiaosong. Influence and prevention of magnetic saturation characteristics of current transformer on relay protection[J]. Electrical Technology, 2023(22):190-192.
- [8] 蔡彪. 一种提高电流互感器饱和状态下继电保护可靠性的方法[J]. 电气开关, 2023, 61(5):70-72.
- CAI Biao. A method to improve the reliability of relay protection under the saturation state of current transformer[J]. Electrical Switch, 2023, 61(5):70-72.
- [9] 张军,肖耀荣,刘在勤. 互感器设计[M], 沈阳:沈阳变压器研究所, 1993.
- [10] 冯继超. 高精度小变比电流互感器的特殊设计[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(8):21-25.
- FENG Jichao. Special design of high-precision and small-ratio current transformer[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 28(8):21-25.
- [11] 互感器第2部分:电流互感器的补充技术要求: GB/T 20840.2—2014[S]. 2014.
- Transformers — Part 2: Supplementary technical requirements for current transformers: GB/T 20840.2 — 2014[S]. 2014.
- [12] 贺春安,祝祺,吕超群,等. 电流互感器短时热电流试验二次绕组烧毁原因及解决方案[J]. 变压器, 2024, 61(6):44-48.
- HE Chunan, ZHU Qi, LYU Chaoqun, et al. Cause and solution of secondary winding burnout in short-time thermal current test of current transformer[J]. Transformers, 2024, 61(6):44-48.
- [13] 张志良. 电流互感器饱和检测方法研究[D]. 山东大学, 2018.
- [14] 乐海琦. 电流互感器饱和对变压器差动保护的影响[J]. 电气技术与经济, 2024(5):318-320.
- LE Haiqi. Effect of saturation of current transformer on differential protection of transformer[J]. Electric Technology & Economics, 2024(5):318-320.
- [15] 于明星. 电流互感器用超微晶磁芯的磁化曲线拟合模型研究[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2023, 25(4):93-97.
- YU Mingxing. Research on fitting model of magnetization curve of ultramicrystal core for current transformer[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2023, 25(4):93-97.
- [16] 刘义. 考虑线性区大小的电流互感器饱和识别方法研究[J]. 电气技术与经济, 2023(10):305-308.
- LIU Yi. Saturated identification method of current transformer considering linear region size[J]. Electrical Technology and Economy, 2023(10):305-308.
- [17] 蔡同甫. 高压油浸正立式电流互感器的绝缘结构技术研究及制作[J]. 中国新技术新产品, 2013(21):114.
- CAI Tongfu. Research and production of insulation structure technology for high pressure oil-immersed vertical current transformer[J]. China New Technology and New Products, 2013(21):114.
- [18] 王增文,林峰,黄楚秋,等. 高可靠绝缘电流互感器研究[J]. 装备制造技术, 2023(6):27-31.
- WANG Zengwen, LIN Feng, HUANG Chuqiu, et al. Research on highly reliable insulated current transformer[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(6):27-31.
- [19] 尚耀辉,赵建洲,刘亚亚,等. 油纸绝缘电流互感器的绝缘设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(3):25-27.
- SHANG Yaohui, ZHAO Jianzhou, LIU Yaya, et al. Insulation design of oil-paper insulated current transformer[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3):25-27.
- [20] 何平,唐中. 电流互感器的绝缘裕度与试验结果分析[J]. 高电压技术, 1995(3):59-61.
- HE Ping, TANG Zhong. Analysis of insulation margin and test results of current transformer[J]. High Voltage Technology, 1995(3):59-61.

作者简介:

杨茜(1982—),女,工程师,主要从事电流互感器技术工作。E-mail:xixi_0528@163.com。

刘水平(1965—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器及互感器技术工作。

周浪(1983—),男,工程师,主要从事电流互感器技术工作。

杨硕亮(1985—),男,工程师,主要从事电压互感器及耦合电容器技术工作。

李宇(1991—),男,工程师,主要从事电流互感器技术工作。

江世伟(1990—),男,工程师,主要从事互感器技术工作。