

Rogowski线圈的动模实验研究

聂一雄¹, 韩小涛², 程汉湘¹, 李伟², 尹项根², 陈德树²

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510090; 2 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了基于 Rogowski线圈传感的电子式电流互感器在与电磁式电流互感器并联运行时的实验结果, 并以变压器差动保护为例对两种传感器的保护特性进行了比较分析研究。实验结果表明: 在保证传感器绕制工艺和合理选择信号处理电路结构参数的情况下, 与电磁式电流互感器相比, 基于 Rogowski线圈原理的电子式电流互感器能准确反映一次侧暂态电流的变化情况, 具有无饱和、测量准确、响应速度快的特点, 完全满足电力系统的保护和控制在电流信号采样的要求。

关键词: Rogowski线圈; 动模实验; 电子式电流互感器

中图分类号: TM77; TM45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897 (2006) 19-0011-07

0 引言

以 Rogowski线圈为传感头的电子式电流互感器以其线性好、反应速度快、无磁饱和、体积小、重量轻等特点, 已经成为世界范围内电子式电流互感器研究和应用的一个热点。介绍了基于 Rogowski线圈传感的电子式电流互感器与电磁式电流互感器并联运行的动模实验的研究结果。

1 实验布局

该传感器设计安装在华中科技大学电力系统动模实验室的 5 号机组实验运行, 该机组的额定运行电流为 43.48 A, 故障最大暂态电流约为 800 A, 根据这些参数, 由文献 [1] 给出的计算公式, 对传感器的线圈骨架和漆包线的尺寸进行了理论计算, 根据计算结果选择骨架半径 $s = 20 \text{ mm}$, 线径 $r = 0.15 \text{ mm}$ 的漆包线制作传感器, 为提高传感器的抗干扰能力, 采用了双层密绕的方式。理论计算的参数值分别为: 互感 $M = 3.36 \mu\text{H}$, 自感 $L = 21.5 \text{ mH}$, 内阻 $r = 296 \Omega$; 实验测得一组共 12 个传感器的自感 $L = 21.4 \pm 0.2 \text{ mH}$, 内阻 $r = 293 \pm 5 \Omega$, 当工频 50 Hz 的交流电流穿过 Rogowski线圈时, 其直接感应输出信号为 $1.05 \pm 0.1 \text{ V/kA}$ (折算成互感即为 $M = 3.34 \pm 0.3 \mu\text{H}$), 且在 $5 \sim 600 \text{ A}$ 范围内其响应具有极好的线性度 (优于 0.1%)。

按照文献 [2] 给出的计算公式合理选择传感器信号处理电路的参数, 对传感器输出信号进行一致

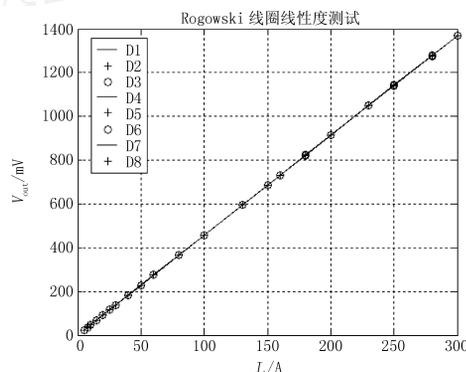


图 1 磁位计的线性度及重复性测试曲线

Fig 1 Curves of repetition and linearity of Rogowski coil

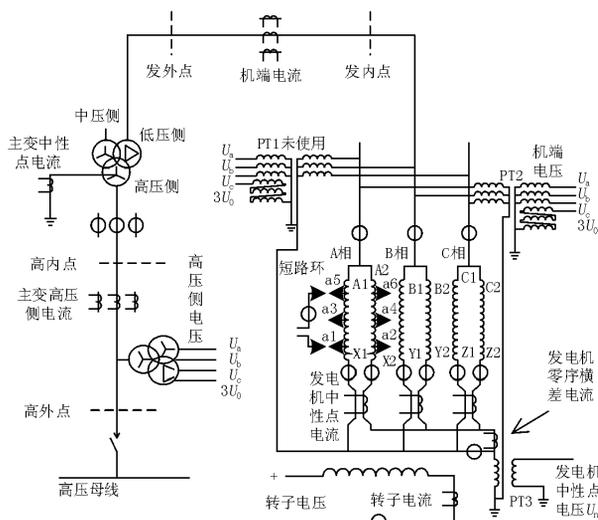


图 2 动模实验原理性线路图

Fig 2 Experimental circuit of dynamic simulation

性处理后, 传感器输出获得了最佳幅频特性。图 1 给出了一个 Rogowski线圈传感的电子式电流互感

基金项目: 第 33 期中国博士后科学研究基金资助项目 (2003033461)

器的线性度和重复性测试曲线。从图中可以看出,这种互感器具有非常好的线性性。

电力系统发生故障后的暂态过程反映了故障时的重要电量信息。对暂态过程的真实测量将有利于后续保护和控制设备对系统运行状况的分析、判断和处理。电子式电流互感器的一个独特优点是传感器可以设计为测量、保护通用目的,因此,对其暂态特性的实验研究是这类传感器设计的一个重要组成部分。采用图 2 所示实验电路,作者对这种电子式互感器的暂态响应进行了研究。图中“O”表示电子式电流互感器。

2 动模实验

动模实验分为暂态过程冲击实验和变压器保护特性比较实验两部分,数据记录设备为 ZH-2 电力故障分析装置。

2.1 暂态响应特性实验

Rogowski 线圈的不饱和特性是其应用在保护系统的一个重要原因。作者在动态模拟试验中模拟了变压器的各种故障情况,并使用传统电磁式互感器和电子式电流互感器串联测试一次故障电流的大小。图 3 和图 4 为实测的一组数据记录波形。从图中可以看到,在故障发生前后电流波形的变化很大,传统电磁式互感器虽然可以实时跟踪测量电流的变化情况,但对于过大的短路电流情况,其感应的电流波形发生了畸变,而 Rogowski 线圈则可以实时无畸变地跟踪测量电流的变化情况。

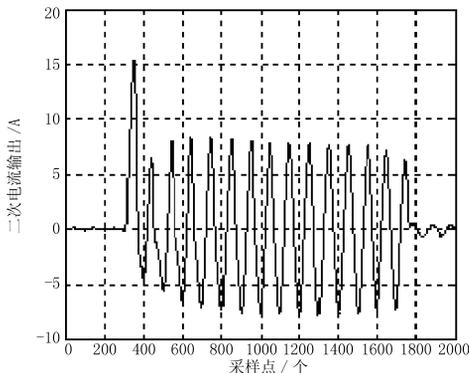


图 3 传统 CT 饱和后的测试波形图

Fig 3 Recorded current wave when CT in saturated state

通过离散信号的傅立叶变换对上面的原始信号进行计算,得到各自所含的基波分量、2~4 次谐波含量的有效值,其对比图如图 5 所示。从各次谐波的对比图中可以看出,Rogowski 线圈产生的谐波含量明显小于传统电磁式互感器。而这种特性对于基

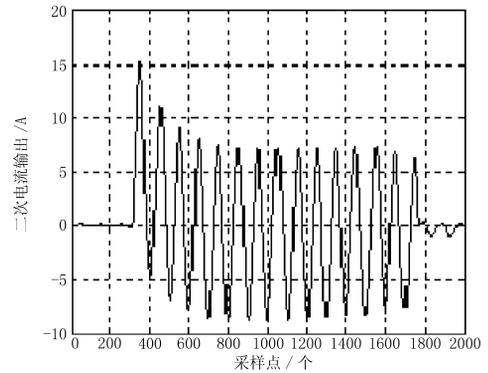


图 4 传统 CT 饱和情况下,光电 CT 输出波形

Fig 4 Current wave of AOCT when CT in saturated state

于基波算法的保护原理来说,有利于提高其动作的可靠性和快速性。

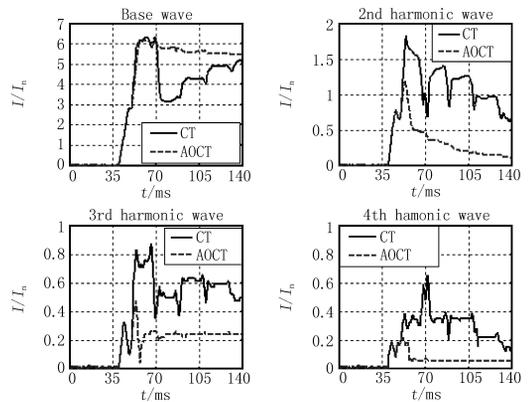


图 5 两种传感器的 1~4 次谐波分析对比图

Fig 5 The 1st to 4th harmonic comparisons of CT and AOCT

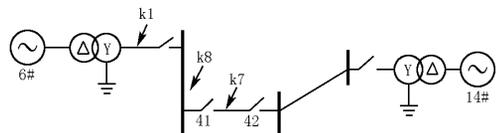


图 6 变压器保护特性实验线路图

Fig 6 Experimental circuit of transformer protection characteristic comparison experiments

2.2 变压器保护特性比较实验

为比较两种电流互感器在保护中的性能上的差异,作者以变压器差动保护为例进行了实验研究。

若规定两侧电流方向以一次侧电流流入变压器为正方向,则可以定义差流 I_d 和制动电流 I_r 的向量表达式为^[3]:

$$\begin{cases} I_d = |I_1 + I_2| \\ I_r = \frac{|I_1 - I_2|}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: I_1 和 I_2 分别为流入变压器两侧对应的电流值。通常为了躲开瞬时不平衡电流,一般采用折线比率制动特性曲线来进行整定动作。用电流基波相量模表示的动作判据为:

$$\begin{cases} I_d > I_{d\min} & I_r < I_{r1} \\ I_d > k(I_r - I_{r1}) + I_{d\min} & I_r > I_{r1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{d\min}$ 为不带制动时差流最小动作电流, I_{r1} 为折线点对应的制动电流。

为实现鉴别励磁涌流的目的,目前的微机变压器保护方案设计中的通常做法是根据差流中二次谐波成分的大小决定是否执行保护闭锁。这虽然可以使保护在变压器发生任何形式的励磁涌流和过励磁时可靠不动作,但也可在故障情况下使保护动作迟缓,影响保护的快速性。所以通过比较计算差动电流中的二次谐波电流与基波电流的幅值之比,可以反应传统互感器由于饱和将对保护系统正常判断所产生的影响。通常决定是否闭锁差动保护的二次谐波制动整定计算公式为:

$$\frac{I_{d2}}{I_{d1}} > K_{d2} \quad (3)$$

其中: I_{d1} 与 I_{d2} 分别是基波和二次谐波电流模值; K_{d2} 为可整定的二次谐波制动比。

基于式(3),采用图6所示动模试验的变压器保护原理性实验电路图,作者进行了有关变压器保护性能的比较实验。该实验模型为三端电源系统,可环网运行也可解网运行。图中,41-42为模拟短线;6#发电机容量为15kVA,额定电压为200V,经变压器升压到800V;14#为模拟大电源系统。短路点k8为变压器区外高压母线故障点,k1为变压器区内高压侧故障点。实验是在常温条件下进行的,有关互感器的配置情况请参见图2。

测试数据是由故障录波器记录的。实验中录波器设置为15个信道同时采样,通过故障点单次触发录波,将录波数据导出后使用Matlab分析。为了说明主要问题,这里选取了几个典型原始波形,包括变压器保护区外k8点AB相短路故障不饱和、k8点A相对地短路故障饱和、变压器保护区内AB相短路故障饱和等情况下的故障数据。具体波形及说明如图7-图20所示。为了便于比对,测试数据都是换算到一次侧,并以各自端的 I_n 为标么值计算的;同时,为了便于叙述方便,在本文中简称变压器高压侧A相为高压A相,低压侧A相为低压A相,其余类推。

1) 区外 k8点 AB相短路故障

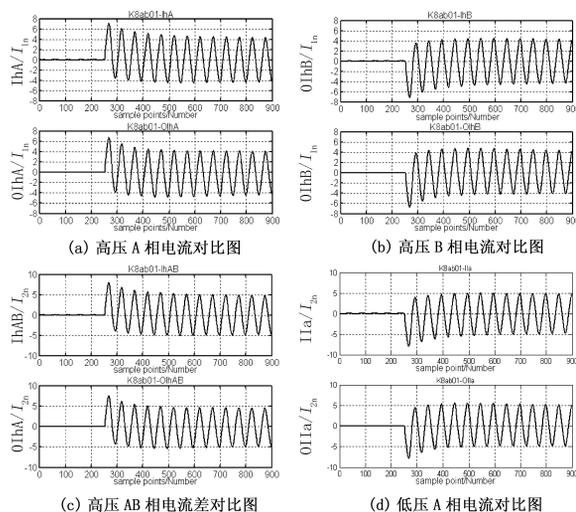


图7 k8点高压侧 AB相短路故障电流波形对比图

Fig 7 Current waves comparison of CT and AOCT on short circuit at k8 between phase A and phase B on HVAC side

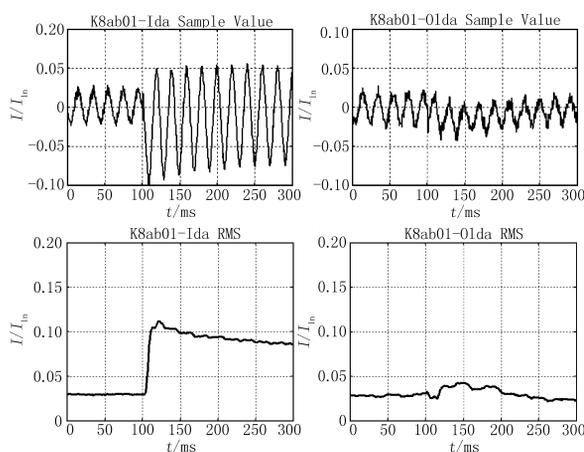


图8 k8点高压侧 AB相短路 A相差动电流的计算值对比图

Fig 8 Comparison of calculated differential current wave and RMS value of phase A of CT and AOCT on short circuit happened at k8 between phase A and phase B on HVAC side

k8点为区外故障,不管有没有饱和现象,保护都应该可靠不动作。在AB相短路后,通过两种电流互感器测得电流波形对比图如图7所示。可见,高压A相、高压B相和低压a相的电流都没有发生饱和现象。以A相为对象,通过计算得到图8所示的A相差动电流波形,图9的制动电流波形。图中, I_{da} 为传统互感器的差动电流, $O I_{da}$ 为电子式电流互感器的差动电流; I_{ra} 为传统互感器的制动电流, $O I_{ra}$ 为电子式电流互感器的制动电流。

按照有关公式计算故障后一个周波的基波相量,这里差动电流和制动电流以额定电流 I_n 为标么

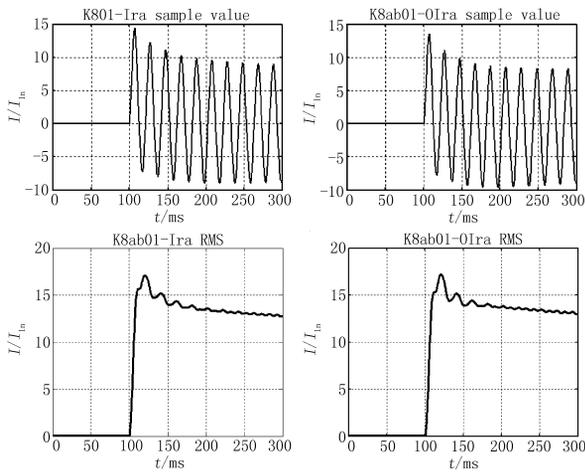


图 9 k8点高压侧 AB相短路 A相制动电流的计算值对比图
Fig 9 Comparison of calculated restraint current wave and RMS value of phase A of CT and AOCT on short circuit happened at k8 between phase A and phase B on HVAC side

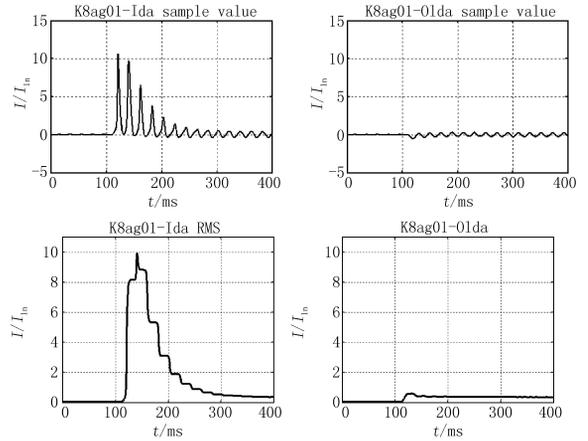


图 12 k8点高压侧 A相对地短路的 A相
差动电流的计算值对比图
Fig 12 Comparison of calculated differential current wave and RMS value of phase A of CT and AOCT on grounding short circuit happened at k8 at phase A (HVAC side)

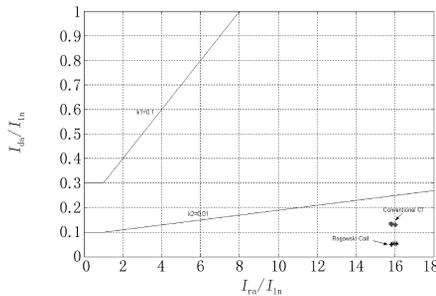


图 10 k8点高压侧 AB相短路故障的比率制动特性曲线
Fig 10 Comparison of calculated ratio-restrained characteristic curve of CT and AOCT on short circuit happened at k8 between phase A and phase B on HVAC side

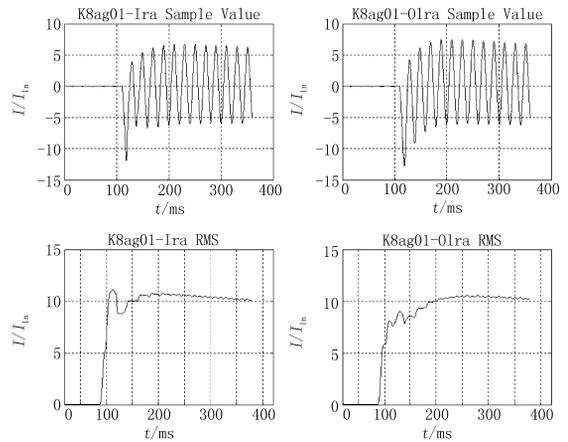


图 13 k8点高压侧 A相对地短路的
A相制动电流计算值对比图
Fig 13 Comparison of calculated restraint current wave and RMS value of phase A of CT and AOCT on grounding short circuit happened at k8 at phase A (HVAC side)

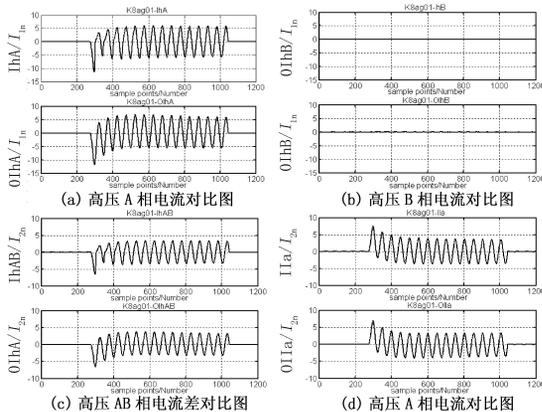


图 11 k8点高压侧 A相对地短路故障电流波形对比图
Fig 11 Current wave comparison of CT and AOCT on grounding short circuit at k8 at phase A (HVAC side)

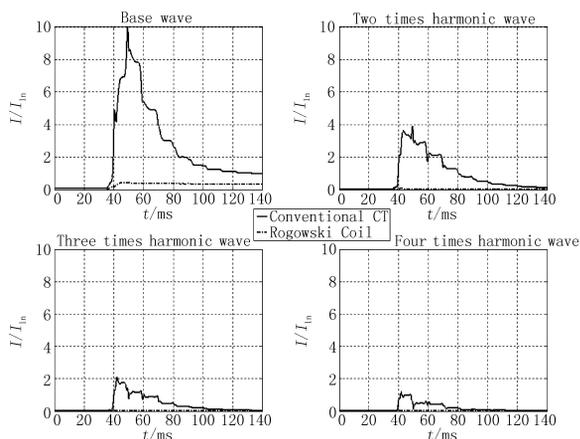
值计算。由于采样率为 2.5k,一个数据窗内采样点为 50个,从故障后一个周内均匀取 25点后绘制出的变压器差动保护的折线比率制动特性曲线如图 10所示。图中 I_{dl} 取为 1 倍的 I_{ln} , $I_{dl min}$ 分别取为 0.3 倍的 I_{ln} 和 0.1 倍的 I_{ln} , k_1 取为 0.1, k_2 取为 0.01。

从图 10 可以发现,由于故障时没有饱和现象,电子式电流互感器和传统互感器特性非常接近。传统互感器和电子式电流互感器的特性点都落在制动区域内,均可以可靠不动作。电子式电流互感器在变压器区外故障不饱和情况下,可以保证可靠不动

作。

2) 区外 k8点 A相对地短路故障

在 k8点 A相对地短路后,通过两种电流互感器测得电流波形对比图如图 11所示。从图中可以看到,高压 A相电流因为短路缘故,电流很大,传统互感器发生饱和现象,而电子式电流互感器没有饱和发生。通过计算得到图 12所示的 A相差动电流波形,图 13的制动电流波形, I_{da} 为传统互感器的差动电流, $O I_{da}$ 为电子式电流互感器的差动电流; I_{ra} 为传统互感器的制动电流, $O I_{ra}$ 为电子式电流互感器的制动电流。



14 k8点高压侧 A相对地短路的故障差流谐波含量对比图

Fig 14 Harmonic current comparison of calculated fault differential current of phase A of CT and AOCT on grounding short circuit happened at k8 at phase A (HVAC side)

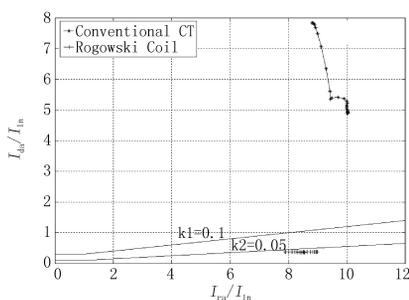


图 15 k8点 A相对地短路故障的比率制动特性曲线

Fig 15 Comparison of calculated ratio-restrained characteristic curve of CT and AOCT on grounding short fault happened at k8 at phase A (HVAC side)

从图 12中发现,由于传统互感器存在一相饱和后,差动电流变的很大,最大峰值有 I_n 的 12倍之多,最大有效值也接近 I_n 的 10倍。而电子式电流互感器的差流有效值由于没有饱和现象仍然维持在很小的 I_n 范围内。对图 12中差流的谐波分析得到

图 14,图中表明由于故障相的传统电流互感器出现饱和,使得差流中的基波和谐波含量大大增加,而电子式电流互感器由于不存在饱和现象,差流本身就很小,基波和谐波含量也很小。依照同前的原则,取出故障后一个周波内 25点后绘制动作特性曲线如图 15所示。

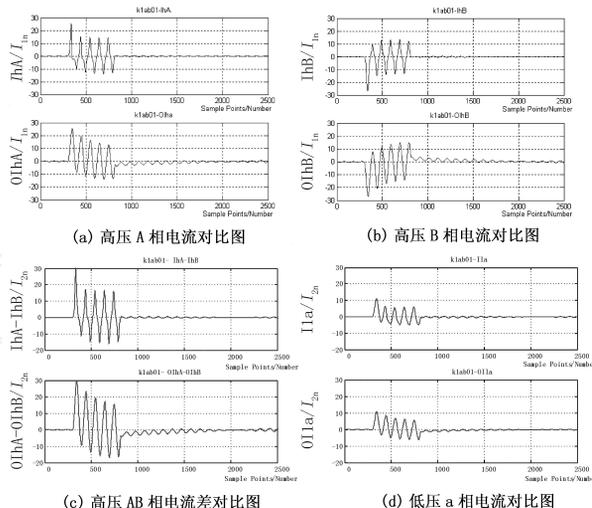


图 16 变压器区内 AB相短路故障波形对比图

Fig 16 Fault current wave comparison of CT and AOCT on short circuit fault happened inside transformer zone between phase A and phase B

图 15中 I_{r1} 取为 1倍的 I_n , $I_{d \min}$ 分别取为 0.3倍的 I_n 和 0.1倍的 I_n , k_1 取为 0.5, k_2 取为 0.05。从图中可以发现,不管什么情况下,电子式电流互感器的动作特性依然在制动区域,可以保证保护可靠不动作。而传统互感器在 $I_{d \min} = 0.3 I_n$, $k_2 = 0.1$ 和在 $I_{d \min} = 0.1 I_n$, $k_2 = 0.05$ 时,传统互感器所有的点都落在动作区内,将产生误动。

3) 变压器区内 AB相短路故障

变压器区内 AB相短路故障的录波数据如图 16。可以发现,此时对于传统互感器的高压 A相、高压 B相和低压 a相均发生饱和现象,计算出的差流如图 17所示。从图中可以看到,传统互感器的波形畸变严重。由于是区内故障,此时保护应该是可靠动作,并且尽可能的快。

通过上图中的波形数据绘制出特性曲线为图 19所示, I_{r1} 取为 1倍的 I_n , $I_{d \min}$ 分别取为 0.3倍的 I_n , k_1 取为 0.5, k_2 取为 1。从图中可以发现, k_1 时传统互感器和电子式电流互感器均可以可靠动作; k_2 时,传统互感器跳出了动作区,将有可能产生拒动情况,而电子式电流互感器一直在动作区内,可以可靠

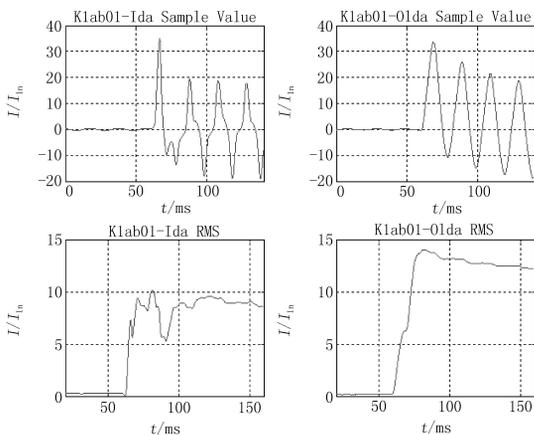


图 17 变压器区内高压 AB 相短路的差动电流计算值对比图

Fig 17 Comparison of calculated differential current wave and RMS value of CT and AOCT on short circuit happened inside transformer zone between phase A and phase B at HVAC side

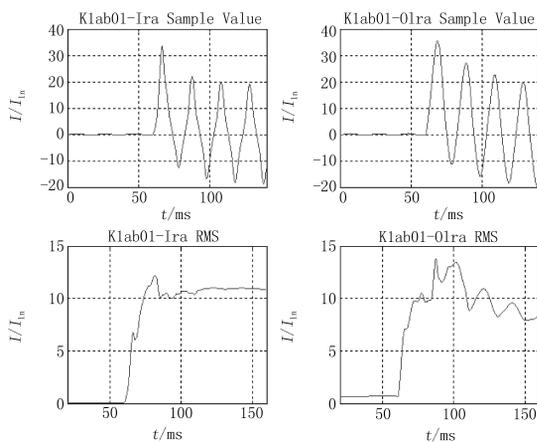
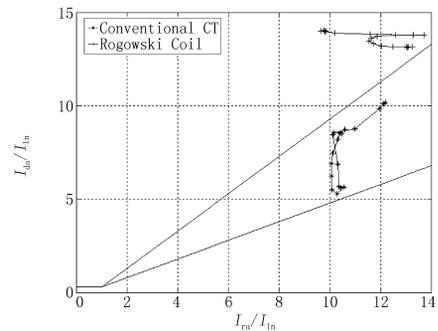


图 18 变压器区内高压 AB 相短路的制动电流计算值对比图

Fig 18 Comparison of calculated restraint current wave and RMS value of CT and AOCT on short circuit happened inside transformer zone between phase A and phase B at HVAC side

的动作。所以电子式电流互感器比传统互感器的可靠性高。

另外,由于在内部故障时,差流中含有二次谐波分量,微机保护会采用式(3)判断二次谐波的大小并进行闭锁。这里选取二次谐波制动比的整定值 K_{12} 为 0.13(13%)。计算后的二次谐波含量如图 20 所示。图中 t_1 时刻(60 ms)为故障发生时刻, t_2 时刻(80 ms)为计算出第一个故障后谐波含量值的时刻, t_3 时刻(95.5 ms)为传统互感器谐波含量降低到 13%后的时刻。由于电子式电流互感器的谐波含量



19 变压器区内高压侧 AB 相短路故障的比率制动特性曲线

Fig 19 Comparison of calculated ratio-restrained characteristic curve of CT and AOCT on short circuit happened inside transformer zone between phase A and phase B (HVAC side)

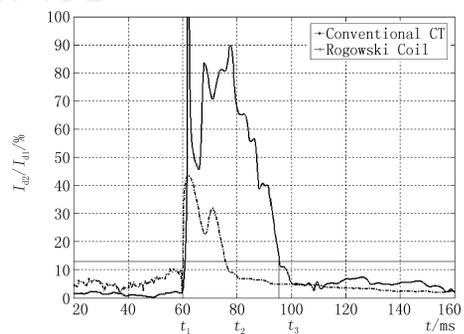


图 20 变压器区内高压侧 AB 相短路故障差流中二次谐波含量比图

Fig 20 The 2nd harmonic current comparison of calculated fault differential current of CT and AOCT on short circuit happened inside transformer zone between phase A and phase B (HVAC side)

在 t_2 时刻已经降低到 13%以下,不影响保护的動作。而传统互感器只有在 t_3 时刻才可以动作出口,距离故障时刻近 2 个周波时间,故传统互感器由于饱和产生的谐波含量将影响到保护的動作情况。所以在发生内部故障且故障电流存在二次谐波的情况下,即使电子式电流互感器和传统互感器都可以可靠动作,但电子式电流互感器具有更短的动作时间。

从上面的几种典型的故障情况分析中,可以得出以下结论:

1) 区外故障情况下,由于电子式电流互感器在大电流情况无饱和现象,因此,即使在外部严重故障条件下,差动保护的不平衡电流也相对较小,不会出现误动情况,大大提高了保护的安全性。

2) 区内故障情况下,电子式电流互感器由于不存在饱和引起的波形畸变,可以保证动作的可靠性,

同时显著提高了基于谐波制动原理的差动保护的动作速度。

3 结论

基于 Rogowski线圈原理的电子式电流互感器能准确反映一次侧暂态电流的变化情况,具有无饱和、测量准确、响应速度快的特点,完全满足电力系统的保护和控制对电流信号采样的要求,以变压器保护为例的保护特性比较分析研究证明了这种互感器的优越性。另外,由于电子式电流互感器具有测量范围大、没有磁饱和及磁滞现象、频率响应范围宽、抗电磁干扰能力强以及输出低电平信号,易于与数字式保护仪表接口等特点,具有传统互感器难以比拟的优点,其在电力系统的应用将对提高继电保护系统的可靠性、促进保护新原理的研究产生重要而深远的影响,并可为保护提供诸如录波、状态监测和测量之类的新功能。

参考文献:

[1] 聂一雄,尹项根,张哲. 磁位计在电力系统继电保护

中应用的可能性探讨[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(16): 35-38

NIE Yi-xiong, YN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Optical Current Transformer Used in High Voltage Power System [J]. IEEE/PES T&D 2002 Asia Pacific c/o International Communications Specialists Tokyo (Japan): 2002. 1849-1853

[2] 陈德树. 计算机继电保护原理及技术[M]. 北京:水利电力出版社, 1992

CHEN De-shu. Theory and Techniques of Computer-based Relay Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992

收稿日期: 2006-02-10; 修回日期: 2006-04-25

作者简介:

聂一雄(1964-),男,博士,副教授,研究方向为传感器、智能检测及仪表;E-mail: nieyx529@gdut.edu.cn

韩小涛(1974-),男,博士,讲师,研究方向为电子式传感器在电力系统中的应用;

程汉湘(1957-),男,博士,教授,主要研究方向为电力电子技术。

Dynamic simulation experiments of Rogowski coil

NIE Yi-xiong¹, HAN Xiao-tao², CHENG Han-xiang¹, LI Wei², YN Xiang-gen², CHEN De-shu²

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The dynamic simulation experimental results of the electronic current transducer based on magnetic potentiometer in parallel connection with the electromagnetic current transducer are introduced. The comparison researches of two type transducers in protection relaying characteristics are also discussed with the transformer protection as an example. The experimental results show, compared with the traditional instrument transformer, this kind of current transducer can exactly reflect the transient courses of primary currents on condition that the coiling technics could be ensured and the parameters of the signal processing circuit could be reasonably schemed. With the characters of no saturation and exact measurement and rapid response, it can totally satisfy the demands of the protective relays and control in electric power system.

Key words: Rogowski coil; dynamic simulation experiment; electronic current transducer

“许继”成为河南省标志性品牌

中国品牌研究院经过认真评定,日前公布了 275 个省标志性品牌,“许继”顺利被评为河南省标志性品牌。

根据制订的评定标准和收集的公开数据,中国品牌研究院主要从三方面对候选品牌进行了评定,一是品牌企业所处的行业是否为当地代表性行业,所谓代表性行业指当地行业在全国同行业中处于重要地位或该行业为当地支柱性产业;二是品牌产品或服务市场占有率和知名度是否居国内行业前列;三是品牌企业的技术创新、产品开发能力是否居行业前列。

据了解,在 275 个省标志性品牌中,消费品类品牌超过三分之二,其次是医药保健类、IT 家电和纺织服装类品牌。标志性品牌每个省份最多为 10 个,这些品牌将成为全国各地的经济名片。