

基于电子式电流互感器的线路光纤纵差保护

王晓芳^{1,2}, 周有庆², 李付亮^{2,3}

(1. 邵阳学院电气工程系, 湖南 邵阳 422004; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 湖南水利水电职业技术学院电力工程系, 湖南 长沙 410131)

摘要: 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器(ECT)没有饱和现象, 可以从根本上解决由于 CT 饱和造成差动保护误动情况的发生。笔者阐述了 ECT 的暂态转变特性, 论述了积分时间常数对 Rogowski 线圈暂态特性的影响。以线路光纤纵差保护为例, 利用实验数据分析了采用 ECT 后纵差保护的可靠性, 指出采用 ECT 后保护在区外故障可靠性、区内故障灵敏度方面有显著提高, 继而改进了传统的二段式比率制动差动保护动作特性。鉴于实用化的要求, 遵循 IEC 61850 标准给出了 ECT 与线路光纤纵差保护的接口实现方案, 并设计了一款信息合并单元的硬件方案。

关键词: 电子式电流互感器; Rogowski 线圈; 线路光纤纵差保护; 动作特性; IEC 61850; 合并单元
中图分类号: TM452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2009)04-0029-05

Differential Protection of Optical-fiber Line Based on Electronic Current Transformer

WANG Xiao-fang^{1,2}, ZHOU You-qing², LI Fu-liang^{2,3}

(1. Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422004, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, China;
3. Department of Electric Power Engineering, Hunan Hydroelectric Occupational College, Changsha 410131, China)

Abstract: The Rogowski coil based electronic current transformer has no saturation phenomenon, thus it can completely eliminate the misoperation of differential protection due to CT saturation. The transient characteristics of ECT and the impact of integration time constant on transient characteristics of Rogowski coil are described in this paper. Taking the fiber longitudinal differential line protection as an example, the performance of longitudinal differential protection using ECT is analyzed based on experimental data. It is shown that by using ECT, both the sensitivity and reliability of the relay protection are improved, and the operation property of conventional two-stage percentage restraint differential protection is meliorated. To meet the practical requirements, an implementing scheme of the interface between ECT and fiber longitudinal differential line protection is designed conforming to IEC 61850 standard. Moreover, a hardware scheme of data merging unit is proposed.

Key words: electronic current transformer(ECT); Rogowski coil; optical-fiber line differential protection; action characteristic; IEC 61850; merging unit

0 引言

纵差保护通过比较输电线路两侧各相的电流相量, 判断线路上是否有短路故障发生, 该保护具有良好的选择性, 能快速、可靠地切除故障, 是高压、超高压输电线路的主保护之一。传统的超高压输电线路纵差保护利用电力载波通道, 以高频方向保护和高频闭锁距离保护两种形式存在。光纤通道具有传输速率高、与输电线路没有任何联系、受到的干扰小、可靠性高、频带较宽、传输容量大等优点, 因而可以利用光纤

通道传输继电保护信息, 构成光纤纵差保护。

常规纵差保护存在的最大问题就是, 采用电磁式电流互感器(CT)的二次侧电流量进行比较, 在外部发生短路故障时, 可能会使铁芯饱和, 从而导致 CT 的暂态输出电流发生畸变, 产生很大的不平衡电流, 使差动保护发生误动作^[1,2]。针对 CT 饱和导致差动保护误动的现象, 电力工作者提出了一些有效的抑制措施, 例如利用小波变换原理检测 CT 是否饱和^[3], 在饱和时准确闭锁保护, 在饱和消失后再开放保护, 从而确保了保护的正确动作, 但是, 这种办法会增加保护的复杂性, 并且降低了保护的速动性,

收稿日期: 2008-08-26; 修回日期: 2008-11-23

基金项目: 湖南省教育厅科技项目(08c787)。

作者简介: 王晓芳(1965), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统微机保护和变电站自动化的研究工作。

这与纵差保护的快速动作特性是相违背的;还有就是采用具有比率制动的差动特性,设置动作门槛,这种方法能提高保护动作的可靠性,但会降低内部故障时的动作灵敏度,也不甚理想。电子式电流互感器(ECT)具有测量范围宽、绝缘简单可靠、无磁饱和、无二次开路危险、抗电磁干扰能力强、体积小、重量轻、安装运输方便、易于同微机保护接口等优点^[4,5],能够从根本上解决区外故障时的误动作现象^[6-9]。笔者从 ECT 的暂态传变特性出发,以实验的手段,证明了 ECT 能准确地传变一次电流,论述了积分时间常数的选择对其暂态特性的影响。分析了各种故障情况下采用 ECT 后纵差保护的动作性能,指出应用 ECT 的纵差保护在可靠性、灵敏度等性能方面有显著地提高,并针对 ECT 实用化的要求,遵循 IEC 61850 标准,对 ECT 与线路光纤纵差保护装置的接口进行了设计。

1 ECT 的电流传变特性

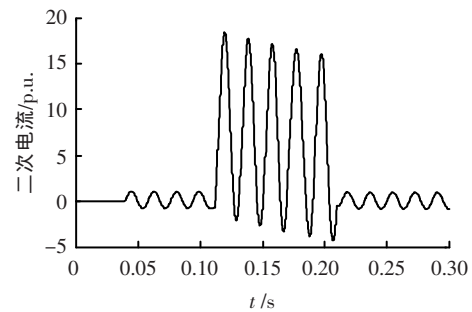
1.1 ECT 的暂态传变特性

当系统发生短路故障时,电流互感器的一次侧电流中存在很大的非周期分量,导致电流偏于时间轴的一边,极端情况下出现全偏移的情况,大量非周期分量的存在容易使电磁式电流互感器进入饱和,在电磁式电流互感器饱和情况下,互感器本身会产生丰富的各次谐波,使二次电流发生畸变,不能如实反映一次系统的电流,就不能为保护提供可靠的数据依据,常常导致差动保护误动作。ECT 由于采用空心线圈,没有铁芯,因而不存在饱和现象,能正确反映故障情况下一次电流的各次谐波含量,为继电保护正确动作提供了可靠的数据依据,采用 ECT 是降低差动保护误动的有效途径之一。

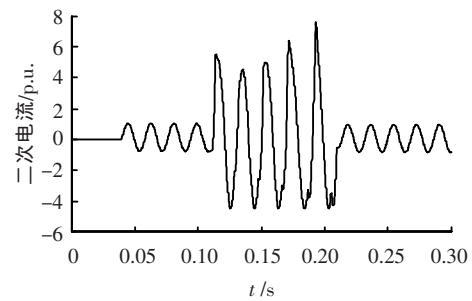
图 1 给出了系统三相短路故障时通过 ECT 与电磁式电流互感器传变的 A 相电流的波形以及 A 相电流中存在的非周期分量的波形。发现短路故障时 A 相电流含有很大的非周期分量,导致了电磁式电流互感器进入饱和,波形发生了严重的畸变;而 ECT 不存在饱和,能真实反映一次电流的波形。

1.2 积分时间常数对 ECT 暂态特性的影响

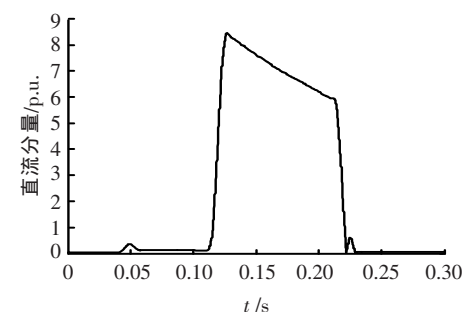
由 Rogowski 线圈电流互感器的原理可知,线圈的输出信号是被测电流的微分函数,因此必须通过积分器将线圈的输出信号还原为与被测电流波形一致的信号。积分器的合适与否对基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器能否良好地刻画故障电流的暂态过程有着重要影响,特别是积分时间常数的选择是否合适对暂态特性的影响尤甚。当积分时间常数选择过小时,在低频段不再具备理想积分器的频率特性,因而不能正确反映直流分量的衰减情况,积分器的输出出现失真的现象。实际制作的 ECT 取



(a)ECT 的 A 相电流



(b)电磁式电流互感器的 A 相电流



(c)A 相电流的直流分量

图 1 三相短路故障 A 相电流的对比

Rogowski 线圈绕组自身的电阻为 270Ω ,线圈的自感为 21.56 mH ,线圈的等效杂散电容为 0.12 nF ,取样电阻为 $10 \text{ k}\Omega$ 。积分时间常数分别为 20 与 40 时,对应积分器的输出见图 2。可见,时间常数过短时积分器的输出出现失真,适当增大时间常数后积分器的输出能如实刻画输入的电流信号。

但是,如果积分时间常数过大,电流的衰减时间过长,在保护切除故障后仍然能够检测到电流,将误认为断路器尚未完全灭弧,严重时甚至可能影响重合闸的正确动作,因而选择合理的积分时间常数能够改善 ECT 的暂态特性。

2 基于 ECT 的纵差保护性能分析

2.1 纵差保护基本原理

电流纵差保护就是利用基尔霍夫电流定律,比较流入被保护元件各端的电流量,依据流入各节点的电流和为零这一规律,判别故障处于区内还是区外,具有良好的选择性和快速性。这个原理无论对瞬时值还是有效值都是有效的,即瞬时值差动保护

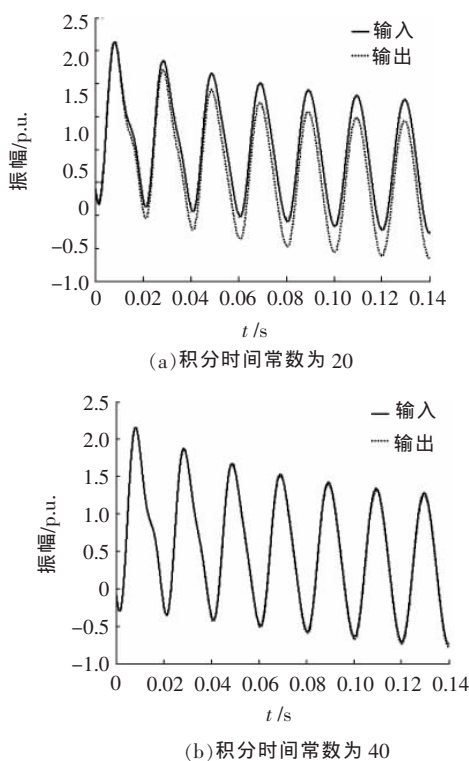


图2 积分时间常数对 ECT 暂态特性的影响

与相量差动保护。对于传统的线路纵差保护,由于采用电磁式电流互感器,且一般未考虑分布电容电流的影响,在区外故障时可能会存在很大的不平衡电流,为了减少不平衡电流对纵差保护的影响,常采用带制动特性的纵差保护,其中最常用的就是二段式比率制动差动特性,其特性见图3。

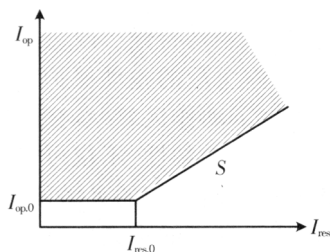


图3 二段式比率制动差动保护特性

原理方程如下

$$I_{op} > I_{op,0} \quad (I_{res} \leq I_{res,0}) \quad (1)$$

$$I_{op} \geq I_{op,0} + S(I_{res} - I_{res,0}) \quad (I_{res} > I_{res,0}) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, I_{op} 为差动电流, $I_{op,0}$ 为差动作最小值, I_{res} 为制动电流, $I_{res,0}$ 为制动电流最小值, S 为二段式比率制动系数。

差动电流的计算

$$I_{op} = |I_1 + I_2| \quad (3)$$

制动电流的计算:

$$I_{res} = |I_1 - I_2| / 2 \quad (4)$$

式(3)、(4)中, I_1 、 I_2 为线路两侧二次电流矢量值。

2.2 故障时的保护动作特性分析

以 A 相区外、区内故障为例,分析基于 ECT 的纵差保护实验数据与故障电流波形,截取故障电流

数据,拟合动作特性,再与整定的二段式比率制动特性比较,可以发现,由于 ECT 不存在饱和现象,在区外故障时,保护能可靠不动作;区内故障时,保护能准确、快速动作。

2.2.1 区外故障且电磁式 CT 不饱和

区外故障且电磁式 CT 不饱和时,理论上讲,无论采用电磁式电流互感器还是采用电子式电流互感器,保护都应该可靠不动作。图4是采用 ECT 计算得到的 A 相差动电流与制动电流的波形图,分析二者可以发现,此时差流较小,制动电流很大,因而保护不会误动。为了证实采用 ECT 后保护可靠不误动,特将比率制动特性整定得比较“松”(即有利于保护动作,取 $I_{op,0}$ 为 0.2 p.u., $I_{res,0}$ 为 1 p.u., S 为 0.1),然后截取故障数据进行拟合,得到实际的动作特性,见图5,可以清楚地发现,动作特性不会进入保护动作区域,且有较大的余地。

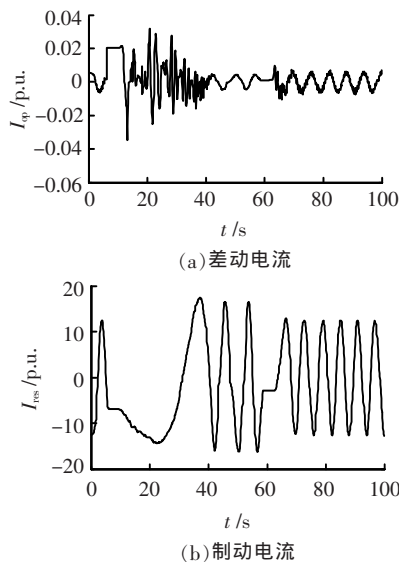


图4 区外故障且电磁式 CT 不饱和时 A 相计算电流波形

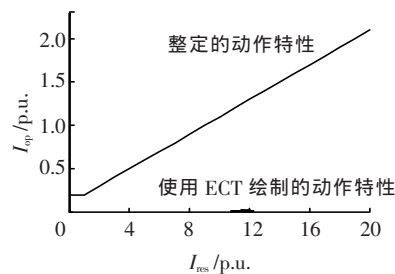


图5 拟合的动作特性

2.2.2 区外故障但电磁式 CT 饱和

区外故障但电磁式 CT 饱和时,理论上讲,采用电磁式电流互感器的保护可能误动,而采用电子式电流互感器的保护应该可靠不动作。图6是采用 ECT 计算得到的 A 相差动电流与制动电流的波形图,分析二者可以发现,此时差流较小,制动电流很大,因而采用 ECT 后保护也不会误动。同情况 2.2.1 一样,比率制动特性整定比较“松”(同情况 2.2.1),

拟合故障数据得到实际的动作特性示于图 7。可以发现,动作特性也不会进入保护动作区域,同样有较大的余地。

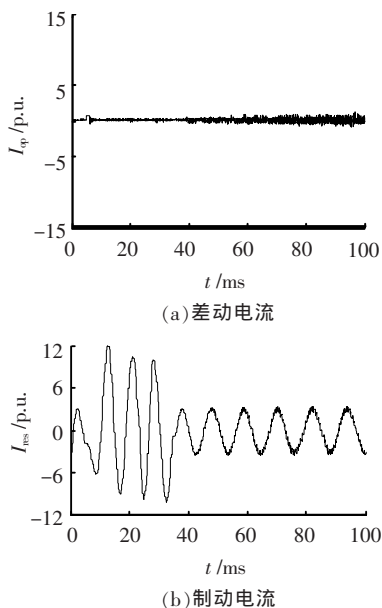


图 6 区外故障但电磁式 CT 饱和时 A 相计算电流波形

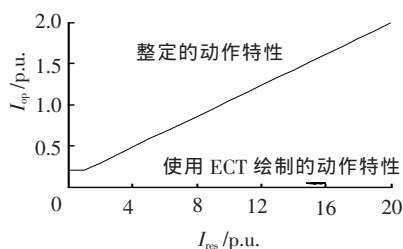


图 7 拟合的动作特性

2.2.3 区内故障

当区内故障时,无论采用电磁式电流互感器还是电子式电流互感器,保护装置都应准确动作。图 8 是采用 ECT 计算得到的区内故障 A 相差动电流与制动电流的波形图,由于采用 ECT,没有饱和现象,电流波形没有发生畸变,分析二者可以发现,此时差动电流很大,制动电流开始较大,然后基本消失,因而保护可以准确动作。为了证实保护此时能准确动作,特将比率制动特性整定得较“紧”(即不利于保护动作,取 $I_{op,0}$ 为 0.8 p.u., $I_{res,0}$ 为 0.8 p.u., S 为 1),拟合故障数据得到的实际动作特性见图 9,发现动作性能准确进入到动作区域。

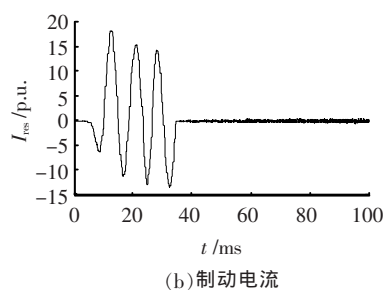
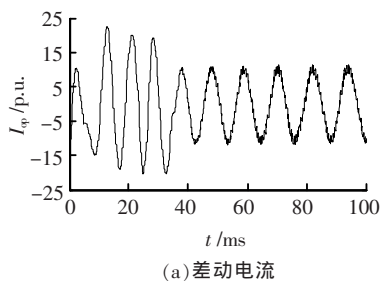


图 8 区内故障时 A 相计算电流波形

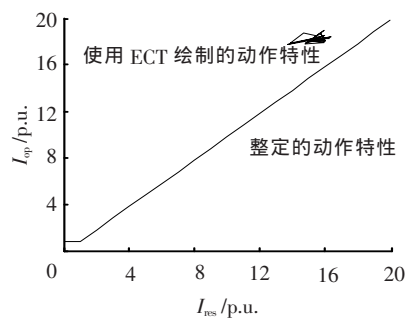


图 9 拟合的动作特性

2.2.4 采用 ECT 后比率制动特性整定的改进

采用 ECT 构成的纵差保护,没有饱和现象,所以在区内故障时,差动电流很大,但是制动电流一般很小;在区外故障时,差动电流较小,制动电流很大。采用电磁式 CT 的差动保护,比率制动特性的整定主要考虑躲过不平衡电流的影响,而采用 ECT 后,理想情况下没有不平衡电流,因而可以对原有比率制动特性的整定加以改进,具体来讲,可以减小差动动作最小值和制动系数,考虑分布电容的影响,仍然采用二段式比率制动特性,改进后的比率制动特性见图 10,采用 ECT 后的差动保护特性动作区域由原来的 A 区变为了动作区域 A+B,增大了动作区域。改进后的比率制动特性,不仅可保证保护的可靠性,更重要的是可提高保护的灵敏度,这是引入 ECT 后给纵差保护性能带来的重大变革。

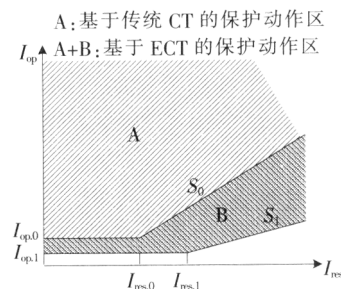


图 10 基于 ECT 的差动保护特性

3 ECT 与线路光纤纵差保护的接口设计

3.1 ECT 与线路光纤纵差保护的接口方案

IEC 61850 标准是关于变电站自动化系统的第一个完整的通信标准体系,它将变电站分为 3 层:过程层、间隔层、变电站层。ECT 是过程层“数字化”的

关键设备,保护装置则是间隔层的主要设备,解决二者的接口问题是 ECT 实用化的关键技术。关于 ECT 的数字化输出接口,IEC 60044-8 与 IEC 61850-9 给出了规范^[10-12],一致定义合并单元作为 ECT 数字化输出的接口。有了合并单元,ECT 就能真正实用于线路光纤纵差保护,图 11 示出了 ECT 应用于线路光纤纵差保护的接口结构图。其整体功能内涵包括: Rogowski 线圈将高电压电路上的大电流准确地变换为二次低压电路上的小的电流微分信号; A/D 将模拟信号进行模数变换得到数字信号,然后通过电光变换器变成光信号,经光纤通道传送到信息处理单元,信息处理单元处理后的电流数字信号通过端子排送入合并单元; 合并单元按照 IEC 61850-9-2 规范的要求,传输模拟量采样值的特殊通信服务映射,将多路电流送入线路光纤纵差保护进行故障判别,基于 IEC 61850-9-2 的过程层与间隔层通信系统,能满足采样率和间隔层内部通信等有更高要求的情况,非常适合于差动保护; 差动保护要求保证多路电流 A/D 回路采样的同时性,利用 GPS 同步信号源做合并单元的外部同步时钟输入信号,然后给各路发送同步转换信号; 2M 专用光纤通道用于两台线路光纤保护装置间的信息交换。

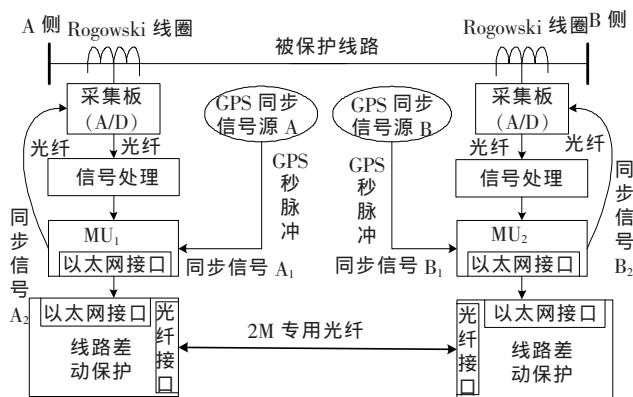


图 11 ECT 与线路光纤纵差保护的接口实现

3.2 合并单元的设计

IEC 61850-9 定义的合并单元,其内容包括各路电流、电压量及其有效性标志,此外还添加了一些反映开关状态的二进制输入信息和时间标签信息。一个合并单元应包含如下功能模块:多路数据采集、处理功能模块和串口发送功能模块和同步功能模块,其功能模型见图 12。

依据合并单元的功能模型,设计了一款合并单元的硬件电路,其硬件组成见图 13。设计的信息合并单元由基于 ARM7 芯核的 LPC2220 核心主板、SDRAM、Flash EPROM、以太网接口、键盘、LCD 显示、输入输出逻辑接口、采样脉冲发生器、GPS 同步脉冲输入接口、晶振和电源组成。

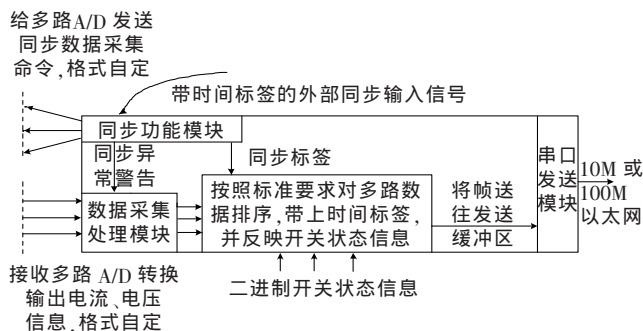


图 12 合并单元功能模型

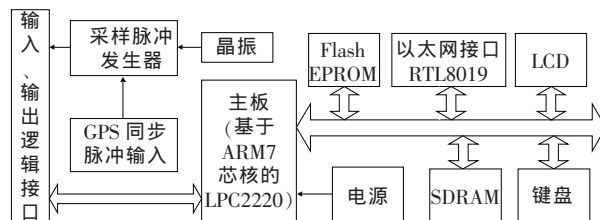


图 13 信息合并单元硬件结构框图

4 结论

(1)研究了基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的组成结构,分析了 Rogowski 线圈的工作原理,通过实验验证了 ECT 不存在饱和现象,可以准确传变一次电流。

(2)通过实验分析了基于 ECT 的纵差保护的動作特性,得出采用 ECT 的纵差保护能保证区内故障正确动作,区外故障准确不动作。

(3)采用 ECT 后,二段式比率制动差动特性的整定条件可以放宽,即可减小差动动作最小值和制动系数,因而,不仅可以保证保护的可靠性,更重要的是可提高保护的灵敏度。

(4)提出了遵循 IEC 61850 标准,利用信息合并单元作为 ECT 与线路光纤纵差保护的接口,并给出了实际的硬件设计,解决了 ECT 的实用化问题。

(5)特高压、超高压线路故障电流包含丰富的暂态谐波成分,ECT 能准确传变一次电流的各种谐波分量,利用 ECT 的这种特性,可以开发出各种原理的“暂态保护”,对开发基于新原理的特高压、超高压线路保护具有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] 丁网林, 骆健, 金乃正, 等. 一种新型纵差保护的原理及应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 77-81.
- [2] 李瑞生, 路光辉, 王强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判据[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 70-73.
- [3] 曹豫宁, 李永丽, 张兴华, 等. 基于小波变换的电流互感器饱和实时检测新判据[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 27-30.
- [4] 及洪泉, 张健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-66.
- [5] 顾黄晶, 张沛超. 光学电流互感器对线路差动保护的影响[J]. 电

(下转第 36 页)

(5)可以看出,由于 CVT 存在暂态过程,其测量阻抗必然存在误差。在微机保护采样频率 $f_s=600$ Hz 时,利用 MATLAB 算出在 0.1 s 暂态过程中的测量误差阻抗 ΔZ 的值,见图 5。图 5 中画出了由采样电压、电流计算出的 60 个离散的阻抗值,在电压稳定后最终趋于零。从图 5 中还可以看出短路角 α 较小时测量阻抗误差较大,受暂态过程影响更明显。

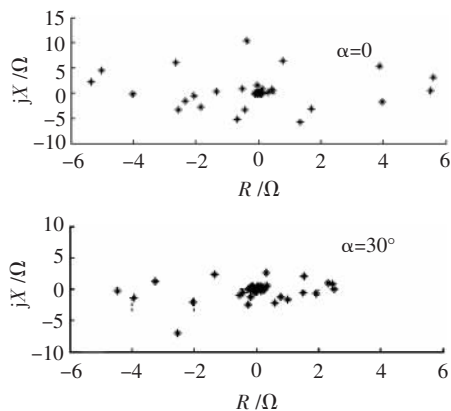


图 5 解微分方程得出测量误差阻抗 ΔZ

3.2 CVT 暂态过程对傅里叶算法的影响

傅里叶算法的思想来源于傅里叶级数,本身具有滤波作用。设 a_1, b_1 分别是基波的正、余弦项振幅, $x(t)$ 为被采样信号,则有离散形式

$$a_1 = \frac{2}{N} \left(\sum_{k=1}^{N-1} x_k \sin k \frac{2\pi}{N} \right) \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{2}{N} \left(x_0 + \sum_{k=1}^{N-1} x_k \cos k \frac{2\pi}{N} + x_N \right) \quad (7)$$

式(6)、(7)中, N 为一个周期的采样点数, x_k 为第 k 次采样值。

在距离保护中,只要对电流、电压信号进行同样处理就可以得到 $a_{1I}, b_{1I}, a_{1U}, b_{1U}$ 等电流、电压基波幅值,利用两点乘法计算出阻抗值

$$X = \frac{b_{1U} a_{1I} - a_{1U} b_{1I}}{a_{1I}^2 + b_{1I}^2} \quad (8)$$

$$R = \frac{b_{1U} b_{1I} + a_{1U} a_{1I}}{a_{1I}^2 + b_{1I}^2} \quad (9)$$

在微机保护采样频率 $f_s=600$ Hz 情况下,利用 MATLAB 算出在 0.1 s 暂态过程中的测量误差阻抗

值,见图 6。每个工频周波可得到一个阻抗值,从图 6 中可以看出,当短路角 $\alpha=30^\circ$ 时,除了第一个周波内计算出来的阻抗偏离较大外,其他值都小于短路角 $\alpha=0$ 时的阻抗值,因此可以得出短路角较小时测量阻抗误差较大。

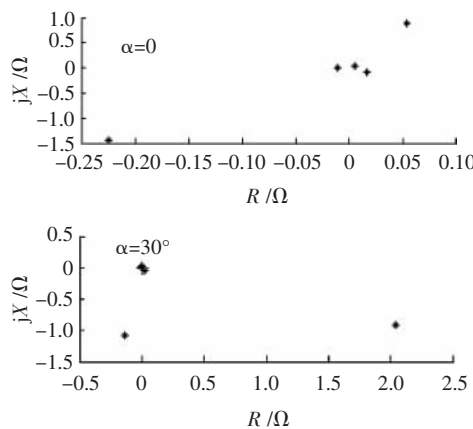


图 6 傅氏算法得出的测量误差阻抗

4 结语

短路相角对 CVT 暂态响应有较大影响,短路相角越小,输出电压幅值越大,衰减越慢,对继电保护影响越大。暂态过程中,傅氏算法较解微分方程算法更为稳定,且有滤波作用,因而受外界影响更小。为了减小暂态过程中 CVT 对保护的影响,防止保护误动,可对保护出口作适当的延时。

参考文献:

- [1] 庞亚东. 国家电网公司 110~500 kV 变电站互感器典型规范编制情况介绍[J]. 电力设备, 2007, 8(6): 16-19.
- [2] 房金兰. 电容式电压互感器的技术发展[J]. 电力电容器, 2007(2): 1-4.
- [3] 杨育霞, 马朝华, 许 珉. 电容电压初值对 CVT 铁磁谐振影响的仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 10-13.
- [4] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [5] 郁惟镛, 吴小建. 电容式电压互感器暂态响应的数字仿真研究[J]. 继电器, 1998, 26(1): 27-32
- [6] 许建安. 电力系统微继电保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [10] IEC 60044-8. Instrument Transformers-part 8: Electronic Current Transformers[S], 2002.
- [11] IEC 61850-9-1. Communication Networks and Systems in Substations-part 9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM)-serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link [S], 2003.
- [12] IEC 61850-9-2. Communication Networks and Systems in Substations-part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM)-sampled Values Over ISO/IEC 8802-3 Link[S], 2003.

(上接第 33 页)

- [6] 韩小涛, 李 伟, 尹项根, 等. 应用电子式电流互感器的变压器差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 47-53.
- [7] 刘 青, 王增平, 徐 岩, 等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 11-14.
- [8] 李岩松, 刘 君, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器与保护一体化运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 57-62.
- [9] 乔 卉, 刘会金, 王群峰, 等. 基于 Rogowski 线圈传感的光电流互感器的研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 40-43.