

不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究

李旭, 黄继东, 倪传坤, 郝惠贞, 冉志勇, 都磊

(许继电气技术中心, 河南 许昌 461000)

摘要: 分析了电磁式电流互感器和电子式电流互感器暂态特性的差异, 提出了采用差分虚拟制动 CT 饱和和开放的办法来解决不同互感器混用时线路光纤差动保护饱和和误开放的问题。该方法能够有效解决因暂态传递特性不一致引起的饱和和误开放问题。此外由于电子互感器二次时间常数与常规互感器有较大差异, 导致在故障切除后电子互感器侧电流拖尾, 会造成开关跳开后线路保护仍计算有差流, 同时保护各侧电流互感器的二次电流衰减时间常数不一致也存在导致差动保护在区外故障电流切除时误动作。提出使用全周差分傅氏计算保护跳开相的电流, 以避免造成线路保护跳令不能及时收回导致误启动失灵以及区外故障切除引起差动误动的问题。

关键词: 电流互感器; 差动保护; 虚拟制动; CT 饱和

Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures

LI Xu, HUANG Ji-dong, NI Chuan-kun, HAO Hui-zhen, RAN Zhi-yong, DU Lei

(XJ Electric, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper analyzes the difference of transient characteristics of magnetic current transformer and electronic current transformer, and proposes to adopt the method of difference virtual brake CT saturated open to solve the problem of saturation mis open of line optical differential protection when different CTs are used mixedly. This method can effectively solve saturation mis open caused by inconsistent transient transfer characteristics. In addition, secondary time constant of electronic transformer has great difference from that of conventional current transformer, and it results in the current trailing of electronic transformer after fault excision, which can cause line protection still has calculation of differential flow after switch off. And the inconsistent secondary current attenuation time constants of CT at each side of protection can lead to misoperation of differential protection in cutting off the external fault. This paper puts forward the full-circle differential Fourier to calculate the current of jumped phase of protection, in order to avoid mal-start failure caused by not withdrawing jump command of line protection in time and the differential maloperation owing to cutting off external fault.

Key words: current transformer; differential protection; virtual brake; CT saturation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0141-05

0 引言

目前, 电力系统广泛使用的是电磁式电流互感器, 随着电子互感器技术的不断发展, 在智能变电站中逐步开始采用电子互感器, 在电网建设中输电线路存在两侧互感器混用的情况^[1-2]。基于这种状况, 有必要对电子式互感器和传统电磁式互感器在线路两侧混用时对线路差动保护的影响进行研究及分析。本文归纳了电子式互感器和电磁式互感器暂态传递特性的特点, 并利用 RTDS 建模, 通过数模仿真试验验证电子式互感器及电磁式互感器混用对

线路差动保护的影响。试验中发现的问题主要有两个方面:

1) 由于两种互感器暂态传递特性的差异会造成差动保护在区外故障传统侧 CT 饱和时有误动作的情况;

2) 由于两种互感器二次电流衰减时间常数不一致也会对线路差动保护收跳令逻辑产生一定影响。

针对试验中发现的饱和和误动问题, 本文提出了采用差分虚拟制动 CT 饱和和开放判据来解决不同互感器混用时区外故障饱和引起线路光纤差动保护误动的方案, 并通过仿真对新的饱和和开放判据进行了

验证。另外针对电子互感器二次时间常数的不同，对差动保护收跳令逻辑增加差分算法计算电流来解决线路保护在故障切除后可能误启动失灵保护的问题。

1 互感器传递特性分析

1.1 电磁式电流互感器传递特性

电磁式电流互感器受励磁电流的影响，其二次输出电流与一次电流并不是完全呈现正比关系。式(1)为励磁电流的表达式^[3]。

$$i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \left[\frac{T_p}{T_p - T_s} (e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}}) \cos\theta + \frac{\sin\theta e^{-\frac{t}{T_p}}}{\omega T_s} - \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (1)$$

在电流误差坐标图上可以画出当短路电流无偏移时，即 $\theta = 90^\circ$ ， $\cos\theta = 0$ ，误差 δ 随一次电流增大变化的曲线，如图 1 所示。

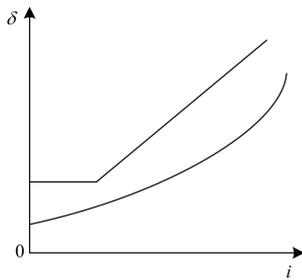


图 1 电流误差曲线

Fig. 1 Current error curve

一般可以通过整定差动保护的最小动作电流来消除在一次电流较小时的误差影响。当一次电流增加，特别是在区外故障时，电流传变误差会很大，此时通过差动保护动作电流定值就很难消除影响，但可以由差动方程的比率制动系数来避免区外故障导致的不正确动作。正常时，线路差动的制动系数一般取值为 0.5 以上，斜率远远大于误差曲线，完全能够满足要求。

电磁式电流互感器是一个铁芯元件，铁芯元件可认为是一个非线性的阻抗，它的磁化曲线是非线性的。当 CT 的工作点将进入磁化曲线的饱和和部分时，励磁电流急剧增大，二次电流不能真实地反映一次电流，CT 不能正确地传变衰减的交直流分量。

1.2 电子式互感器传递特性特点

电子式互感器不含有铁芯，因此消除了磁饱和及磁谐振现象而使互感器运行暂态响应好、稳定性好，保证了系统运行的高可靠性。

从传变特性上，无论是光学互感器还是基于罗

柯夫斯基线圈 (Rogoskwi) 的电子式互感器均具有以下特点：

1) 电子式互感器的暂态传变特性优良^[4]，二次电流无饱和问题，因此在系统故障时如果两侧均采用电子互感器，差动保护可以不需要考虑饱和，较大地提高了差动保护的動作特性。

2) 由于电子式互感器的积分回路设计差异会造成二次电流衰减时间常数较大^[5]，在故障切除时电流拖尾对保护会有一些的影响。

1.3 电子式互感器和电磁式互感器的比较

表 1 给出电磁式互感器 5P20 级、电子式互感器、光学互感器在响应时间、对直流分量和交流分量的传变特性比较。

表 1 常规电流互感器和电子式电流互感器比较

Table 1 Comparison between conventional current transformer and electronic current transformer

类型	响应时间	变化的直流分量	稳态交流分量	二次回路时间常数	饱和现象
5P20 级	忽略	正确传变	正确传变	$10^3 \leq T_2 \leq 10^4$ ms	饱和
Rogoskwi	忽略	不能正确传变	正确传变	与积分回路有关	不饱和
光学互感器	忽略	正确传变	正确传变	无	不饱和

2 暂态传递特性的影响及解决

由于线路一侧仍采用传统互感器，且传统互感器和电子式互感器两种互感器的暂态传递特性又存在一定的差异，可能会对常规的线路差动保护饱和判别产生影响，因此有必要对线路两侧为混用互感器的线路差动保护进行分析验证。

为了分析验证不同互感器混用对目前差动保护的影响，利用 RTDS 环境进行了故障仿真试验。

在试验过程中，区内饱和及基本的故障对差动保护影响较小，因此本文不再做进一步的分析。只针对试验出现的问题进行分析及验证。

试验过程中在区外故障引起传统 CT 饱和后出现差动保护误动的情况，分析原因为线路的饱和和开放判据误开放引起差动保护误动作。下面对目前差动保护采用的饱和和开放判据进行介绍。

2.1 差动保护饱和和开放判据介绍

差动保护的电流饱和判据一般基于故障后电流互感器需经过一定时间才开始饱和的特点，较多采用的方法有时差法、小波分析法及线性区方法等。

本文分析的线路保护中采用的原始值虚拟制动饱和判据^[6], 具体的方法如下:

稳态故障电流饱和识别主要依据为故障电流每次过零时总是存在一段线性传变区, 因此利用区外故障线性传变区差动电流为 0, 其他时间由于饱和差动电流不为 0; 而区内故障则仅在过零点差动电流为 0 值, 其他情况下差动电流均大于 0。文献[6]中设计一个虚拟制动电流判据进行饱和识别, 首先利用差动电流的自身信息, 虚拟一个制动电流, 然后统计一个周波内大于该制动电流的点数 N , 如果 $N > M$, 则开放差动保护, 否则闭锁差动保护。 M 为固定门槛。

2.2 误动波形分析

试验中线路常规互感器侧的母线 AN 故障, 导致常规电流互感器出现饱和, 此时引起了差动保护误动, 装置的原始录波如图 2 所示。

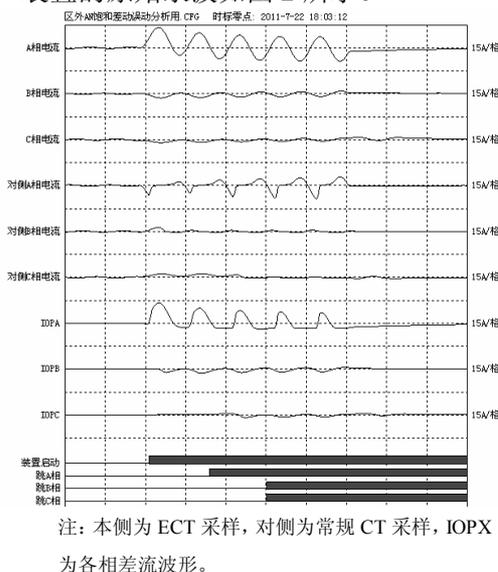


图 2 装置原始录波波形

Fig. 2 Original record wave of device

对图 2 两侧 CT 直流分量含量的分析可以看出传统侧 CT 因为饱和后不能正确传变衰减直流分量, 而电子互感器仍然能够反映一次线路上的衰减直流分量, 直流分量占基波含量的 49.79%, 而传统 CT 饱和后直流分量占基波的 3.616%。

图 3 是饱和后的差流和制动电流。

如图 3 所示, 区外饱和时, 存在制动电流减小, 差动电流增大, 如果不采取抗饱和措施, 差动保护在常规互感器和电子式互感器混用时仍存在误动情况。

由于饱和过程中, 存在直流分量, 使得在区外故障电流过零时即 CT 为线性传变区时, 差流瞬时

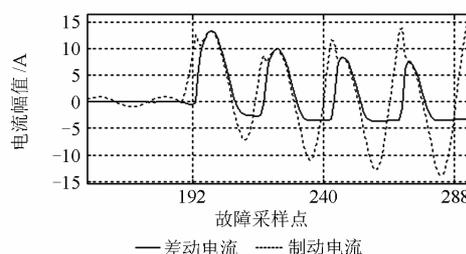


图 3 区外 AN 故障差流波形

Fig. 3 Differential current curve of external AN fault

值并不为零值, 虚拟制动判据的理论依据受到影响, 目前, 线路保护装置中选取的 M 值为 16, 考虑线性区存在 1.67 ms 以上的饱和差动饱和均不会误开放, 原始值虚拟制动方程见式(2)。

$$|I_k| > |I_f| = 0.2 \max(|I_k|) \quad (2)$$

仿真结果显示为故障发生 30 ms 后饱和识别开放动作, 见图 4。图中横坐标 192 点为故障起始点, 从图中看出在故障后满足虚拟制动方程。

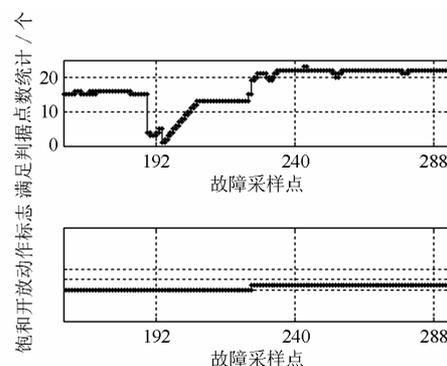


图 4 饱和误开放仿真分析

Fig. 4 Simulation analysis of saturation mal open

2.3 差分虚拟制动方案

分析 CT 饱和时差动电流波形, 可以看出饱和判据误开放的原因主要是两侧互感器对衰减直流分量的传变特性不同引起的。从图 3 的录波波形中也可以看到, 线性区的差流完全由接近于直流的非周期衰减分量构成。

滤除衰减直流分量的有效方法是差分算法, 在离散计算环境时采用差分算法。对差动电流波形首先进行一点差分运算消除直流分量, 差分饱和判据的差分公式如式 (3) 所示。

$$(|I_k - I_{k-1}| / T_s) > 0.2 \max(|I_k - I_{k-1}| / T_s) \quad (3)$$

式 (3) 中, T_s 为装置的采样间隔。采用式 (3) 再次对饱和识别判据进行仿真, 差分后的差流波形如

图 5 所示, 由仿真结果图 6 表明, 在区外故障持续过程中饱和识别开放元件一直未动作。

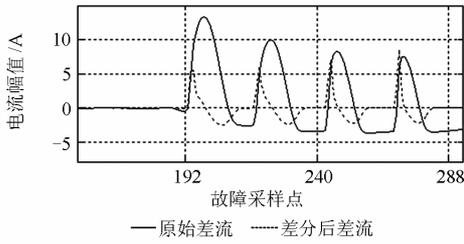


图 5 差分后差流波形

Fig. 5 Differential current wave

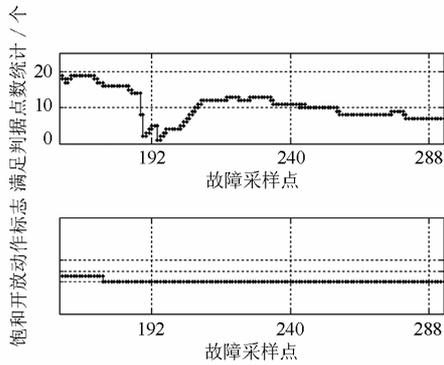


图 6 A 相差流微分后饱和分析

Fig. 6 Saturated flow analysis of A phase differential after difference

3 二次时间常数对差动保护的影响及解决

由于电子互感器二次时间常数较大, 故障切除后, 电子互感器侧电流拖尾, 对差动保护收跳令也有较大影响。

当短路电流切除后, 一次电流变为零, 电流互感器磁场能量将通过二次回路释放使二次回路的电流不能随一次电流立即到零, 该电流就叫电流互感器二次回路残余电流, 可用式 (4) 表示。

$$I_s' > I_s \cdot \exp(-t/T_s) \quad (4)$$

式中: I_s 为断路器断开瞬间电流互感器二次负荷电流的瞬时值; T_s 为电流互感器二次闭合回路的时间

常数, $T_s \approx \frac{L_s}{R_s}$, L_s 为励磁电感和漏电感之和, R_s

为电流互感器二次绕组电阻和外接电阻性负荷电阻之和, 残余电流如前所述, 是二次回路中释放所储存的能量而产生的电流, 其初始值主要由励磁回路的电流值决定, 按照 T_s 进行衰减。

当断路器断开后, 残余电流的衰减情况与互感器的时间常数有关, 一般情况下, 常规互感器的漏

电感和励磁电感之和 L_s 与二次回路的电阻 R_s 相比很小, T_s 较小, 而电子互感器二次侧存在积分回路, 电感相对常规互感器较大, 且二次回路大部分采用光纤, 负荷电阻较小, 因此 T_s 与常规互感器相比较大, 图 7 为电子互感器和常规互感器在开关切除后, 二次残余电流的衰减情况。

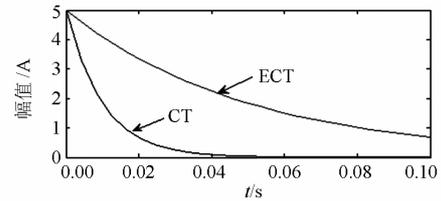


图 7 ECT 和 CT 残余电流衰减曲线

Fig. 7 Residual current attenuation curve of ECT and CT

图 7 中, 衰减较慢的为故障切除后 ECT 的二次电流衰减, 衰减较快为传统 CT 残余电流衰减分布。

在 RTDS 试验中, 发现安装电子互感器侧保护装置在线路故障切除后, 保护跳令总是收回太慢或者跳令收回后再次发出。装置录波如图 8 所示。

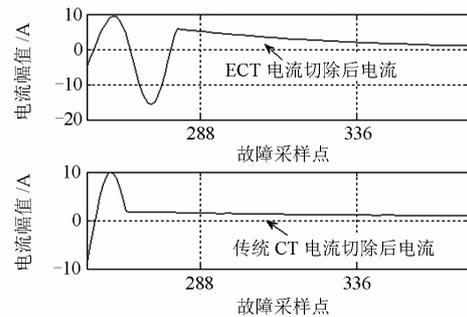


图 8 故障切除后装置录波

Fig. 8 Record wave of device after fault excision

从图 8 看出, 对侧为传统 CT, 对侧电流已经在开关跳开后衰减为很小 (图中 288 点处), 而电子互感器侧保护测量电流由于残余电流衰减很慢, 采用全周傅氏算法计算跳开后的电流, 仍然大于有流门槛, 造成差动保护跳令持续较长时间, 最大会到 100 ms 左右, 存在误启动失灵的风险。

因此考虑对差动保护收跳令判据进行修改: 增加无流判别算法, 使用全周差分傅氏算法后, 消除了衰减直流分量的影响, 约 20 ms 即达到无流条件, 不存在误启动失灵的风险。

同样由于保护各侧电流互感器的二次电流衰减时间常数不一致, 会导致在故障电流切除时差动保护误动作。仍以图 8 为例说明, 当 ECT 的二次电流

在衰减期间, 此时使用全周傅氏计算的差动电流就有可能大于差动保护定值, 并且与制动电流幅值几近相同。解决方案为在故障启动一段时间后(设置 40 ms, 考虑一般的区外故障切除时间), 保护再次动作需要增加固有延时 30 ms, 或者将算法改为全周差分。

4 结论

随着智能变电站的建设步伐不断加快, 电子互感器技术的日益成熟, 有必要对线路光纤差动保护用于常规互感器和电子互感器混用的情况进行性能分析研究。本文对电子互感器和常规互感器特性进行了分析比较, 并根据 RTDS 中遇到的试验问题, 对适用于混合式互感器的线路差动保护部分判据进行了改进^[7-9], 改善了两侧采用常规互感器和电子互感器混用时区外故障常规电流互感器饱和引起相量差动保护误动的问题, 提出了跳闸逻辑中增加全周差分傅氏算法以解决两侧互感器二次衰减时间常数不同跳令过长的问题。采用上述方案后, 对于电子式和电磁式电流互感器混合应用时光纤差动保护的性得到了较大的提高。

参考文献

- [1] 李文正, 李宝伟, 倪传坤, 等. 智能变电站光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 136-140.
LI Wen-zheng, LI Bao-wei, NI Chuan-kun, et al. Study on sample synchronization method for optical differential protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 136-140.
- [2] 张兆云, 刘宏君, 张润超. 数字化变电站与传统变电站间光纤纵差保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 58-60.
ZHANG Zhao-yun, LIU Hong-jun, ZHANG Run-chao. Research on optical-fiber line differential protection between digitized substation and traditional substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 58-60.
- [3] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le, WU Ju-ye. Application note of protective current transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [4] GB 1208—1997 电流互感器[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
GB 1208—1997 current transformers[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [5] 郭乐, 申狄秋, 卢家立. 电子式互感器积分方案的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 111-114.
GUO Le, SHEN Di-qiu, LU Jia-li. A comparative study of integral methods in electronic instrument transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 111-114.
- [6] 杨恢宏, 谢百煌, 毕大强, 等. 基于虚拟制动电流采样点差动的 CT 饱和识别方法[J]. 继电器, 2006, 34(13): 50-53.
YANG Hui-hong, XIE Bai-huang, BI Da-qiang, et al. Using the sampling differential protection based on the constructed restraint current to identify CT saturation[J]. Relay, 2006, 34(13): 50-53.
- [7] 童悦, 李红斌, 张明明, 等. 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 59-64.
TONG Yue, LI Hong-bin, ZHANG Ming-ming, et al. An all-digital on-line calibration system for high voltage current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 59-64.
- [8] 朱国防, 陆于平. 扇环型制动区差动保护算法析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 172-177.
ZHU Guo-fang, LU Yu-ping. A novel differential protection with sectoring restraint region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 172-177.
- [9] 汪珣, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-179.
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-06-13

作者简介:

李旭(1977-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统保护等; E-mail: lixu@xjgc.com

黄继东(1980-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统保护等;

倪传坤(1980-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统保护等。