

DOI: 10.7667/PSPC151064

基于频数分布的防止变压器差动保护误动的新方法

白加林¹, 高昌培¹, 王宇恩¹, 赵武智¹, 牛静¹, 赵建新², 黄婷³, 郑涛³

(1. 贵州电网公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司技术支持部, 北京 100085; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 为有效防止变压器区外故障因 CT 饱和引起的差动保护误动, 提出了一种基于频数分布的检测 CT 饱和的新方法。该方法截取从故障发生到差流达到第一个极值之间的部分差流波形并经适当变换, 利用频数分布直方图进行电流波形处理。根据频数分布特征, 能够实现 CT 严重饱和、一般饱和、轻度饱和情况下变压器区内、外故障的准确检测。该方法只需定位故障发生时刻, 而不需定位差流出现时刻, 算法简单, 快速可靠。经大量仿真实验验证了新方法的可靠性和准确性。

关键词: 变压器保护; 差动保护; 波形变换; CT 饱和检测; 频数分布

A new algorithm based on frequency distribution for avoiding the mal-operation of transformer differential protection

BAI Jialin¹, GAO Changpei¹, WANG Yuen¹, ZHAO Wuzhi¹, NIU Jing¹, ZHAO Jianxin², HUANG Ting³, ZHENG Tao³

(1. Guizhou Power Dispatching and Control Center, Guiyang 550002, China; 2. The Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To avoid the mal-operation of transformer differential protection when out-zone fault occurs under current transformer (CT) saturation, a new algorithm based on frequency distribution is proposed. A new current waveform is obtained by a symmetric transformation of initial part of differential current after fault occurred, and then its characteristic is extracted by frequency distribution histogram. In the case of CT's serious saturation, medium saturation, mild saturation, the out-zone fault and the inner-zone fault can be clearly detected by the proposed algorithm. This algorithm only needs detecting the time of fault occurring, while the time of differential current increasing is no more needed, the proposed algorithm is very fast and reliable. Simulation show satisfactory results and validate its flexibility and reliability.

Key words: transformer protection; differential protection; waveform transformation; CT's saturation detection; frequency distribution

0 引言

变压器是交流输电系统的核心设备, 一旦发生故障, 将危及电力系统的安全稳定运行与系统的供电可靠性, 因此, 必须配置性能良好、可靠性高的继电保护装置。差动保护是变压器区内故障的主保护, 但实际运行中, 差动保护的误动事件时有发生。影响差动保护可靠性的因素主要有: 1) 空载合闸时的励磁涌流、故障切除时的恢复性涌流常使差动保护错误的判断为区内故障时的故障电流^[1-3]; 2) 变压器各侧的电压等级不同, 使其各侧 CT 在容量、变比、额定电流、额定二次负载等参数的选择上存在

很大差异, 各侧 CT 型号无法相同, 加上 CT 选型时没有考虑剩磁、二次负载的平衡问题^[4-5], 区外故障情况下变压器各侧 CT 如果出现暂态饱和, 各侧 CT 的饱和程度将会不同, 不平衡电流会明显增大, 尤其是在变压器某侧 CT 出现严重饱和, 而其他侧 CT 均不饱和时, 不平衡电流更大, 表现出区内故障的特征^[6-7]。这些因素都可能使差动保护出现误动情况, 必须采取一定的措施才能保证差动保护的可靠性。

实际中, 针对励磁涌流对差动保护的影响, 已提出过多种方法^[1-2,8-14], 如根据励磁涌流中含有大量的二次谐波分量的特点广泛采用二次谐波制动的

方法^[8,11], 也有根据励磁涌流波形中会出现间断角的特点采用间断角鉴别的方法区分励磁涌流与故障电流^[9], 以防止励磁涌流引起差动保护的误动。针对 CT 的饱和问题, 传统的差动保护从比率制动特性着手^[15], 将制动系数抬高, 以使差动保护具有抗饱和能力, 但抬高制动系数的同时将降低区内故障时的动作灵敏度, 因此, 国内外学者根据区内、区外故障时 CT 二次电流与差流的波形特征提出了许多 CT 饱和检测方法^[16-20], 包括传统的时差法^[16,21-22]、波形奇异性检测法^[23]、谐波制动法^[15,24]、小波变换检测法^[21,25]等, 其中时差法必须精确定位故障发生时刻与差流出现时刻, 当故障电流非常大 CT 饱和程度非常严重时, CT 将会在故障发生后的 1/4 个周期内饱和, 此时故障发生时刻与差流出现时刻相差非常小, 定位可能不准确, 导致检测结果可能出现较大偏差, 造成差动保护误动。小波变换检测法根据 CT 二次电流小波模极大值的差异性检测饱和, 但在电流过零点和窗口临界处, 小波检测法可能出现较大偏差, 影响最终的饱和检测结果。因此, 为解决上述方法存在的不足, 有必要寻找更快速、更准确、使用更少参数的方法检测 CT 饱和以防止差动保护误动。

本文根据区内、区外故障时差流波形存在差异的特点^[26-28], 提出一种基于频数分布特征的新型 CT 饱和检测方法, 能够有效防止 CT 饱和引起的变压器差动保护误动, 该方法是一种基于频数分布的波形分析法, 只需定位故障发生时刻, 将部分差流波形进行变换, 得到新的差流波形, 并做对应的频数分布直方图就可准确检测 CT 饱和。本文利用仿真模型验证了该方法的有效性, 而且算法简单, 能够快速、准确地检测 CT 饱和, 从而有效防止差动保护误动。

1 CT 的饱和特性

1.1 稳态饱和

当作用在 CT 一次侧的稳态对称电流数值过大时, 对应的二次感应电动势也会在电流达到峰值前达到饱和电动势, 使 CT 进入饱和^[16], 此时 CT 的一二次电流如图 1 所示, CT 饱和后, 铁芯的励磁电抗非常小, 接近短路状态, 折算至二次侧的一次电流几乎全部流入励磁支路, 使饱和前与一次电流成线性关系的二次电流通过励磁支路放电并以指数形式衰减至 0。此放电过程中二次电流的变化趋势与二次负载的性质有关, 因 CT 达饱和磁通后, 二次感应电动势接近 0, 根据 CT 二次回路电压方程可知, 二次电流将以时间常数 L_2/R_2 (其中 L_2 表示二

次负载电阻分量, R_2 表示二次负载电阻分量) 衰减, 因此二次负载的功率因数越高, 电阻分量所占比例越高, 能抑制电流变化的电感比例更小, 在 CT 入饱和时, 二次电流会迅速地降低, 在 CT 退饱和时, 二次电流会迅速地升高, 电流变化越快。

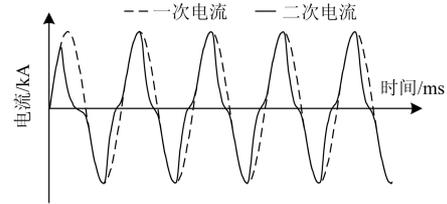


图 1 CT 稳态饱和的电流波形

Fig. 1 CT saturation under steady state

1.2 暂态饱和

在系统发生故障的暂态过程中, CT 的运行工况与稳态运行时存在较大差异, 故障一次电流往往是正常运行电流的几十至上百倍, 数值很大, 且往往含有按指数形式衰减的非周期分量, 该非周期分量虽不产生变化的磁场, 但却能明显改变铁芯的运行工况, 铁芯磁通与一次电流对时间的积分值密切相关, 当一次电流含有非周期分量时, 铁芯磁通将随一次电流非周期分量的存在而不断上升, 直至达到饱和磁通, 使 CT 出现暂态饱和^[16,29], 暂态饱和和电流波形如图 2, 二次电流发生明显畸变, 暂态饱和后的铁芯磁通稳定在饱和磁通。

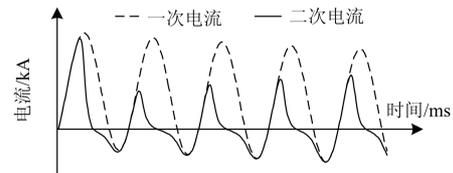


图 2 CT 暂态饱和的电流波形

Fig. 2 CT transient saturation

随着非周期分量不断衰减, 铁芯磁通也会衰减, CT 逐渐退出饱和, 二次电流畸变程度减轻。根据实际现场情况对 CT 的暂态过渡过程进行分析, 得到考虑剩磁的铁芯磁密的表达式为

$$B = \frac{\sqrt{2}I_1R_2}{2\pi fK_nN_2A} \left[\frac{\omega T T_1}{T - T_1} (e^{-\frac{t}{T}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \cos \alpha + \sin \alpha \cdot e^{-\frac{t}{T}} - \sin(\omega t + \alpha) \right] + B_r \quad (1)$$

式中: B 为铁芯磁密; I_1 为一次电流周期分量有效值; R_2 为 CT 二次负载电阻分量; K_n 为 CT 变比; f 为工频 50 Hz; N_2 为 CT 二次绕组匝数; A 为铁芯截面积; T 为 CT 的时间常数; T_1 为一次系统时

间常数； α 为故障发生时一次系统电压的初相角。

从式(1)可看出，暂态过程中的铁芯磁密主要由以下几个因素决定：1) 一次电流波形(包括一次电流周期分量大小、初相角、一次系统时间常数等)；2) 二次负载功率因数；3) 剩磁大小及方向；4) CT 技术参数(包括绕组匝数、铁芯截面积、变比等)。CT 暂态饱和过程很复杂，结合实际情况简化分析可得 CT 暂态饱和的一般规律：

- 1) 铁芯磁密中的非周期分量远远大于周期分量；
- 2) 铁芯磁密是逐渐增大的，说明 CT 饱和需要时间，在这段时间内，CT 仍然是线性传变的；
- 3) 一次电流过零点左右，铁芯磁密小于饱和磁密，CT 仍能线性传变。

2 新方法原理

由上述对 CT 饱和特性的分析可知，故障发生后，CT 的铁芯磁密不是立即增大的，而是经过一定的时间才进入饱和，因此在故障刚开始的一小段时间内，变压器各侧 CT 总存在一小段线性传变区，当发生区外故障时，变压器差流在这段线性区内数值很小，几乎为零，只有在 CT 饱和后，差流才明显增大，即差流波形呈间断状，而当发生区内故障时，差流将随着故障的发生而同时增大，差流波形不存在间断。

图 3(a)为区外故障时 CT 在很短时间内发生饱和的差流大致波形，可见，差流波形是间断的，波形间断区对应 CT 的线性传变区。以故障发生时刻为时间轴零点，并截取故障发生到差流达到第一个极值点的部分波形进行分析，如图 3(a)中的“1”段波形，将其关于原点对称，翻转成图 3(b)中的“2”段波形，组合图 3(b)中的“1”“2”段波形并将电流进行归一化得到“3”段波形。当发生区内故障时，差流明显增大时刻与故障发生时刻是同步的，差流大致波形如图 3(c)，同理以故障发生时刻为时间轴零点，可对区内故障时的差流波形进行相同的变换，差流波形与变换后的波形如图 1(d)，微机保护中利用一定的采样频率对电流进行采样，因此可对变换后的差流做频数分布直方图，发生区内、区外故障的直方图如图 4(a)、图 4(b)。

从区内、区外故障情况下对应的直方图可以看出，区外故障 CT 出现饱和时，如图 4(a)，直方图总体呈“凸”形，即变换后的差流采样点集中分布在平均值周围，取中间电流采样间隔与两侧电流采样间隔的频数之比，记为 K ，则此时 K 值明显大于 1，而区内故障时，如图 4(b)，直方图总体呈“U”

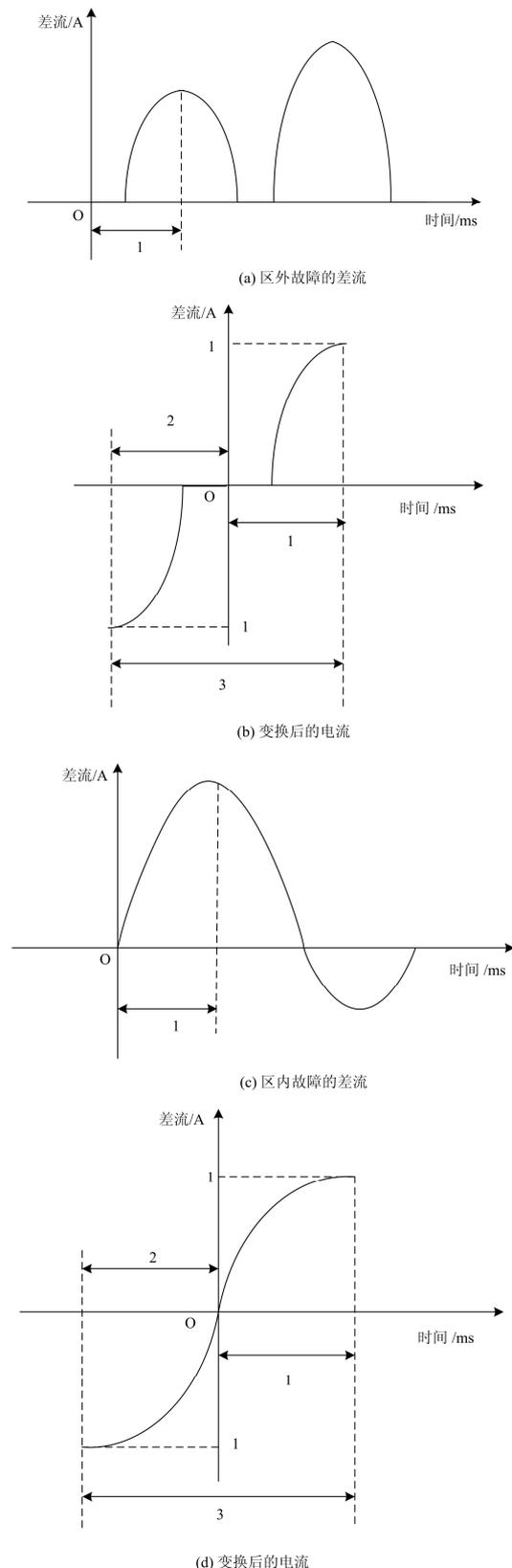


图 3 区外、区内故障差流波形及变换后的电流波形
Fig. 3 Differential current and related current after transformation at out-zone fault and inner-zone fault

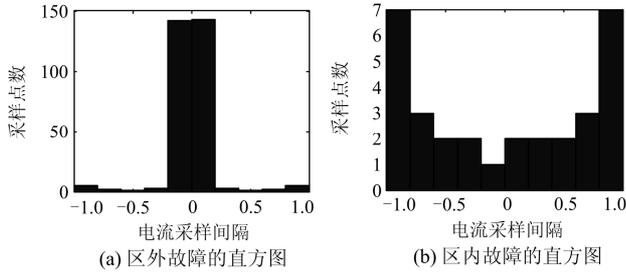


图 4 区外、区内故障差流波形对应的直方图

Fig. 4 Frequency distribution histogram at out-zone fault and inner-zone fault

形,即变换后的差流采样点众数分布在平均值两侧,此时 K 值明显小于 1。将变换后的电流采样点分成 N 个采样间隔,上述原理即可表示为

$$\begin{cases} K = \frac{2f(N_m)}{f(N_1)+f(N_n)} > 1, \text{ 区外故障} \\ K = \frac{2f(N_m)}{f(N_1)+f(N_n)} < 1, \text{ 区内故障} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(N_i)$ 为频数分布直方图中第 i 个采样间隔的频数; $N_m = [\frac{N+1}{2}]$ 为中间的电流采样间隔, $N_1 = 1$ 。

因此,差流经上述变换后,可根据 K 值存在明显差异的特点准确检测出区外故障情况下 CT 出现的饱和。

3 仿真验证

为验证上述新方法的有效性,本文利用 PSCAD 软件对 CT 严重饱和、一般饱和、轻度饱和时的变压器区内外故障情况进行仿真分析。仿真过程采用 220 kV 输电系统模型,如图 5 所示,系统包括一台发电机,一台变压器,一条输电线路和一个无穷大系统,其中变压器为 Y_0d-11 接线,容量 240 MVA,变比为 220/38.5 kV,变压器两侧的 CT 采用基于 J-A 理论的仿真模型,采样率频率为 4 kHz,即一周波 80 点采样。

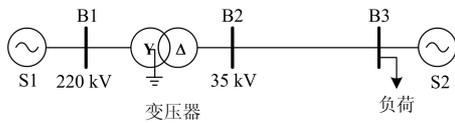


图 5 系统模型

Fig. 5 Simulation model

3.1 区外故障 CT 严重饱和

考虑最严重的情况,变压器角侧在第 2 320 个

采样点处发生三相短路故障,高压侧所有 CT 都未发生饱和,而低压侧 A 相 CT 在故障后 1/4 周期内就已经饱和,以 A 相差流为例,因 A 相差流与角侧 A 相电流与星侧 A、B 相电流有关,所以给出变压器高压侧 A、B 相电流及低压侧 A 相 CT 一、二次侧电流如图 6(a)、图 6(b),A 相差流如图 6(c),由差流波形可知,差流明显增大的时刻与故障发生时刻只相差 13 个采样点左右,即相差 3.2 ms,时间差很短。

根据本文构造的新方法可得变换后的差流波形,

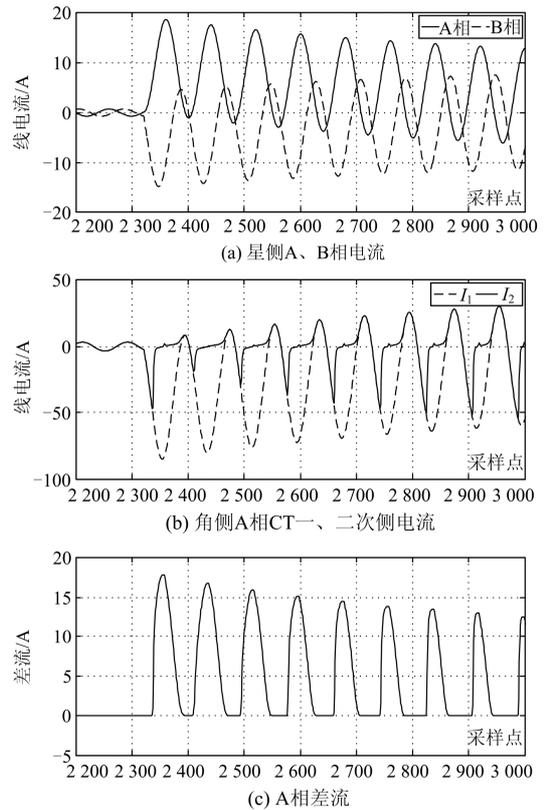


图 6 区外故障 CT 的一二次侧电流及差流波形

Fig. 6 Current waveform of star side of transformer and differential current under CT saturation at out-zone fault

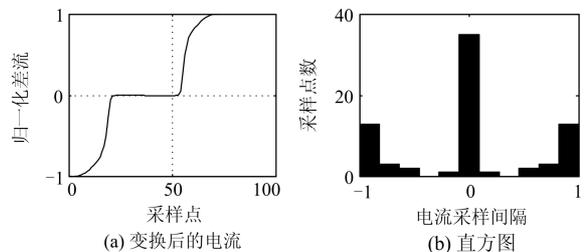


图 7 变换后的电流波形及对应的直方图

Fig. 7 Constructed current waveform and related frequency distribution histogram under CT saturation at out-zone fault

如图 7(a), 并对变换后的差流波形做频数分布直方图, 如图 7(b), 由图 7(b)可知, 直方图呈“凸”形, 众数集中在平均值周围, 经计算求得, $K=2.7$, 大于 1, 表明 CT 发生饱和, 说明该方法能在 CT 出现严重饱和和情况下准确检测出区外故障, 且只需对故障发生时刻定位而不需对差流出现时刻进行准确定位, 加上该算法简单, 快速。

3.2 区外故障 CT 一般饱和

变压器角侧在第 2320 个采样点处发生三相短路故障, 因本文构造的新方法只需利用差流刚出现时的部分波形, 在区外故障时, 差流出现的时刻与 CT 的入饱和时刻同步, 因此只需调整相关参数, 使低压侧 CT 在入饱和时呈现一般饱和, 同样以 A 相为例, A 相 CT 的一、二次侧电流波形如图 8(a), 而高压侧所有 CT 均不出现饱和, 此时 A 相差流波形如图 8(b)。截取差流的部分波形并经适当变换得到变换后的差流波形如图 8(c), 并做相应的频数分布直方图, 如图 8(d), 可直观看出, 直方图呈“凸”形, 求得这种情况下的 $K=16.2$, 明显大于 1, 能够准确地识别区外故障时 CT 的一般饱和, 且新方法识别 CT 一般饱和的灵敏度较高。

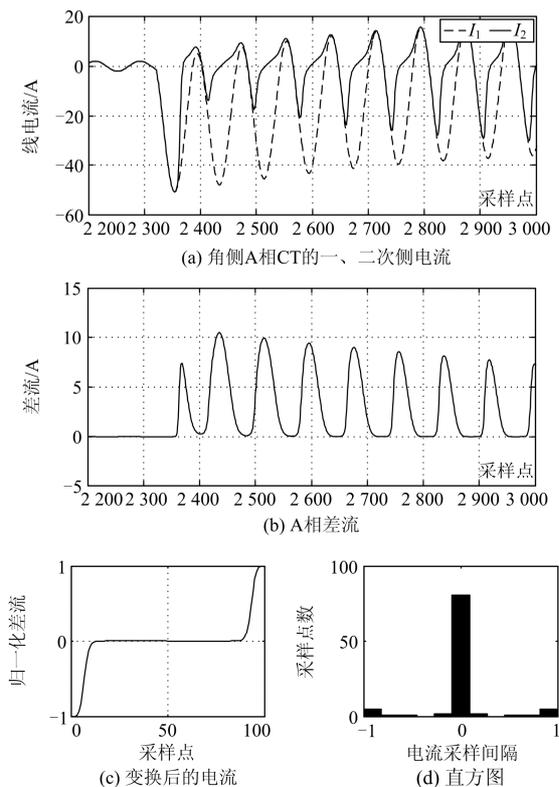


图 8 区外故障时 CT 一般饱和时的差流及对应的直方图
Fig. 8 Differential current and related frequency distribution histogram under medium CT saturation at out-zone fault

3.3 区外故障 CT 轻度饱和

变压器角侧在第 2320 个采样点处发生三相短路故障, 调整相关参数, 使低压侧 CT 只出现轻度饱和, 以 B 相为例, B 相 CT 一、二次侧电流波形如图 9(a), 而高压侧所有 CT 均不出现饱和, 此时 B 相差流波形如图 9(b), 同理, 利用本文的新方法可构造出变换后的差流波形, 如图 9(c), 对应的频数分布直方图如图 9(d)。经计算, 变换后的差流 $K=7.86$, 大于 1, 能够准确检测出区外故障时 CT 的轻度饱和, 且灵敏度较高。

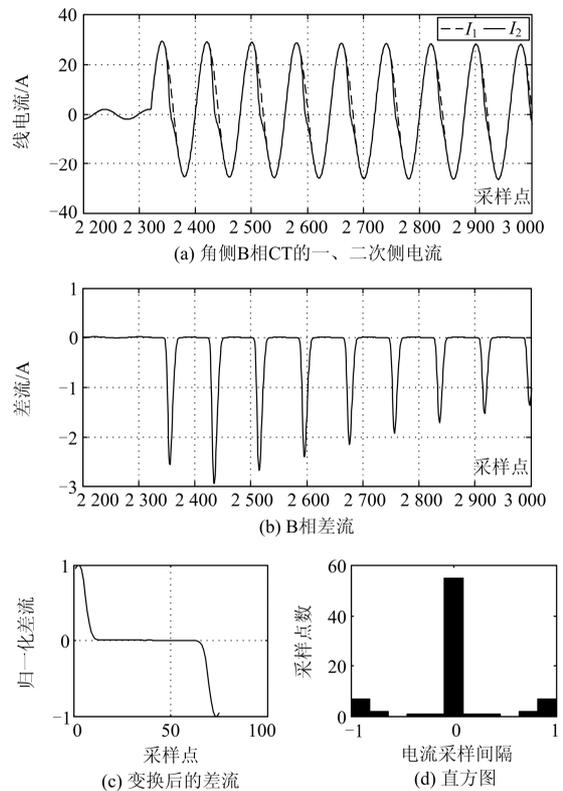


图 9 区外故障时 CT 轻度饱和的差流及对应的直方图
Fig. 9 Differential current and related frequency distribution histogram under mild CT saturation at out-zone fault

3.4 区内故障 CT 未出现饱和

同样, 设变压器角侧在第 2320 个采样点处发生三相短路故障, 高、低压侧所有 CT 都未发生饱和, 以 A 相差流为例, 此时, 变压器 A 相差流波形如图 10(a), 利用本文提出的新方法将截取后的部分差流波形进行变换, 变换后的差流波形如图 10(b), 并作出对应的频数分布直方图, 如图 10(c)。由图 10(c)可知, 直方图整体呈“U”形分布, 经计算, $K=0.75$, 小于 1, 能够准确判定为区内故障而非区外故障时的 CT 饱和, 说明新方法在区内故障的识别上准确度和灵敏度都很高, 而且, 算法简单, 只

要故障后一小段差流的频数分布直方图满足 $K < 1$, 即可准确识别区内故障, 差动保护可立即动作跳出口断路器。

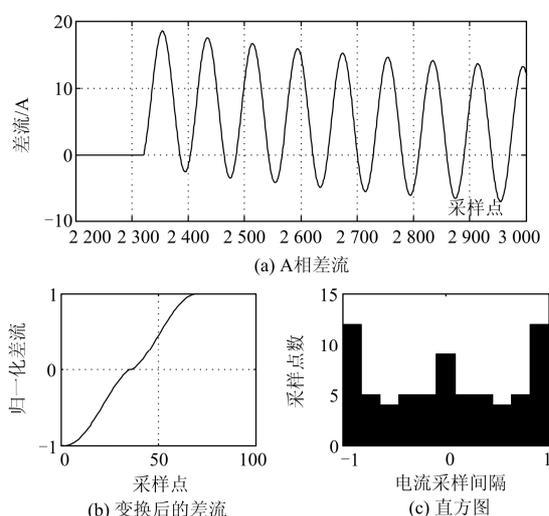


图 10 区内故障时 CT 未饱和时的差流及对应的直方图
Fig. 10 Differential current and related frequency distribution histogram under medium CT saturation at out-zone fault

4 结论

本文提出了一种基于频数分布特征的新型 CT 饱和检测方法, 能够有效防止 CT 饱和引起的变压器差动保护误动, 该方法根据区内、区外故障时差流波形存在差异的特点, 只需定位故障发生时刻, 并提取部分差流波形经适当变换即可得到差异明显的频数分布直方图, 即可准确检测出 CT 严重饱和、一般饱和、轻度饱和情况下的区外故障, 有效防止差动保护误动。新方法算法简单, 快速, 本文利用仿真模型验证了该方法在 CT 饱和识别上的有效性、可靠性与准确性。

参考文献

- [1] 吕志娟, 刘万顺, 肖仕武. 一种快速识别变压器励磁涌流和内部故障的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 47-51.
LÜ Zhijuan, LIU Wanshun, XIAO Shiwu. A novel scheme to fast discriminate inrush current from internal fault of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 47-51.
- [2] 王业, 袁宇波, 高磊, 等. 基于 FSAD 及非周期分量的励磁涌流鉴别算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 127-135.
WANG Ye, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. An algorithm

to identify magnetizing inrush current based on FSAD and aperiodic components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 127-135.

- [3] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 1-8.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 1-8.
- [4] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
YUAN Yubo, LU Yuping, XU Yang, et al. The influence and the countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [5] 朱声石. 差动保护采用 P 级电流互感器的问题[J]. 继电器, 2000, 28(7): 4-7.
ZHU Shengshi. The problem of P class current transformer for transformer differential protection[J]. Relay, 2000, 28(7): 4-7.
- [6] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-145.
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [7] 郑涛, 刘万顺, 刘建飞, 等. 采用数学形态学防止变压器差动保护误动的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 6-11.
ZHENG Tao, LIU Wanshun, LIU Jianfei, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for avoiding mal-operating of transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 6-11.
- [8] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [9] 王祖光. 间断角原理变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979, 3(1): 18-30.
WANG Zuguang. Transformer differential protection based on the dead-angle[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 1979, 3(1): 18-30.
- [10] 兰生, 张小帆. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 1-7.
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 1-7.
- [11] 刘小宝, 吴崇昊, 宋艳, 等. 基于二次谐波的自适应制动涌流方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 131-134, 139.
LIU Xiaobao, WU Chonghao, SONG Yan, et al. Adaptive second harmonic restraint method for inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 131-134, 139.
- [12] 史泽兵, 郝后堂, 江卫良. 一种新型的励磁涌流制动方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 147-150.
SHI Zebing, HAO Houtang, JIANG Weiliang. A new restraint scheme for inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 147-150.
- [13] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.
- [14] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [15] 浦南桢, 翟学锋, 袁宇波, 等. P级TA饱和对数字比率制动特性差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 76-80.
PU Nanzhen, ZHAI Xuefeng, YUAN Yubo, et al. Impaction of P-type CT saturation on digital ratio-restrained differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 76-80.
- [16] 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.
- [17] 邓旭阳, 索南加乐, 李广, 等. 基于参数识别的电流互感器饱和识别原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 38-43, 87.
DENG Xuyang, SUONAN Jiale, LI Guang, et al. A novel current transformer saturation detecting method based on parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 38-43, 87.
- [18] 赵永彬, 陆于平. 一种基于异步法的母线保护中电流互感器饱和判据[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 86-90.
ZHAO Yongbin, LU Yuping. An asynchronous method based saturation criterion for CT busbar protection[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 86-90.
- [19] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 184-190, 235.
BI Daqiang, FENG Cunliang, GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in Current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 184-190, 235.
- [20] 杨青, 郑涛, 肖仕武, 等. 快速识别转换性故障的变压器差动保护新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 61-64, 107.
YANG Qing, ZHENG Tao, XIAO Shiwu, et al. A new criterion for transformer differential protection to rapidly identify transferring faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 61-64, 107.
- [21] 李贵存, 刘万顺, 贾清泉, 等. 利用小波原理检测电流互感器饱和的新方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 26(5): 36-39, 44.
LI Guicun, LIU Wanshun, JIA Qingquan, et al. A new method for detecting saturation of current transformer based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 26(5): 36-39, 44.
- [22] ZHENG Tao, GU Jun, HUANG Shaofeng, et al. A new algorithm to avoid maloperation of transformer differential protection in substations with an inner bridge connection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1178-1185.
- [23] 张新刚, 王泽忠. 采用电压波形特征的电流互感器饱和检测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 59-63.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong. A method detecting current transformer saturation by utilizing features of secondary voltage waveform[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 59-63.
- [24] 王志鸿, 郑玉平, 贺家李. 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(5): 19-24.
WANG Zhihong, ZHENG Yuping, HE Jiali. An algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating

- the harmonics ratio of branch current[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2000, 12(5): 19-24.
- [25] 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(10): 27-30.
- CAO Yuning, LI Yongli, ZHANG Xinghua, et al. A new on-line criterion for current transformer saturation based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 27-30.
- [26] GU Jun, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng. A new algorithm based on the morphological gradient for avoiding mal-operation of transformer differential protection[C] // Power and Energy Society General Meeting, IEEE, Jul. 2010: 1-7.
- [27] 郑涛, 谷君, 黄少锋, 等. 基于数学形态梯度的变压器转换性故障识别新判据[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 75-80.
- ZHENG Tao, GU Jun, HUANG Shaofeng, et al. A new algorithm to distinguish the transferring fault of transformer protection based on morphological gradient[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 75-80.
- [28] 乾维江, 王晓茹. 一种基于形态学梯度的电流互感器饱和检测改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 15-18, 70.
- QIAN Weijiang, WANG Xiaoru. An improved algorithm for current transformer saturation detection based on morphology grade[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 15-18, 70.
- [29] 任先文, 徐宏雷, 孙楷淇, 等. 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 6-9.
- REN Xianwen, XU Honglei, SUN Kaiqi, et al. Simulation of influence of current transformer saturation characteristic by aperiodic current[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 6-9.

收稿日期: 2015-06-25; 修回日期: 2015-12-20

作者简介:

白加林(1984-), 男, 硕士, 工程师, 现从事电力系统继电保护运行方面的工作; E-mail: baibjl@163.com

高昌培(1956-), 男, 教授级高工, 主要从事电力系统继电保护管理方面的工作;

王宇恩(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护管理方面的工作。

(编辑 周金梅)