

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190327

## 基于双门阈值的变压器 Hausdorff 距离快速保护新判据

吴梓亮<sup>1,2</sup>, 曾耿晖<sup>1,2</sup>, 李一泉<sup>1,2</sup>, 王峰<sup>1,2</sup>, 屠卿瑞<sup>1,2</sup>, 杨韵<sup>1,2</sup>, 赵青春<sup>3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600; 3. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 传统变压器差动保护一般采用傅里叶变换提取变压器两侧差流的基波分量, 无法识别变压器内部轻微匝间故障。受数据窗长度的影响, 保护通常至少需要半个周波才能出口动作, 且在外部故障导致电流互感器(CT)饱和时可能出现保护误动。为解决上述问题, 提出了一种基于 Hausdorff 距离的变压器保护新判据, 通过对比变压器高低压侧电流波形的相似度, 以达到快速识别区内外故障的效果。理论分析表明该判据的数据窗长度可以任意选取, 有利于提升保护动作速度, 同时双整定门阈值既保证了严重区内故障情况下保护能够快速跳闸又保证了区外故障伴随 CT 饱和工况下保护准确不动作。最后基于 PSCAD/EMTDC 对所提判据的有效性进行仿真验证。结果表明, 所提判据能快速动作, 动作时间可低至 5.5 ms, 即使发生 0.5% 的轻微匝间故障, 保护也能在故障后一周波内跳闸, 且具有较强的抗 CT 饱和性能。

**关键词:** 变压器; 波形相似识别; Hausdorff 距离; 匝间故障; CT 饱和; 双整定门阈

### A novel criterion for fast protection of transformer based on Hausdorff distance and double threshold

WU Ziliang<sup>1,2</sup>, ZENG Genghui<sup>1,2</sup>, LI Yiquan<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>, TU Qingrui<sup>1,2</sup>, YANG Yun<sup>1,2</sup>, ZHAO Qingchun<sup>3</sup>

(1. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Key Laboratory for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 3. Nari-relay Engineering and Technique Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Traditional transformer differential protection generally uses Fourier transform to calculate fundamental component. It cannot identify low percentage interturn faults inside the transformer. And the operating time is usually more than half a cycle affected by the length of data window. What's more, the protection may operate by mistake when there is an external fault accompanied by CT saturation. In order to solve the above problems, a new criterion for transformer protection based on Hausdorff distance is proposed in this paper. The similarity of current waveforms on both sides of the transformer is compared to distinguish the internal faults from external ones quickly. Theoretical analysis shows that the length of the data window can be selected arbitrarily in new criteria, which is conducive to improving the protection action speed. At the same time, the double setting threshold ensures not only the rapid tripping speed in the case of severe faults, but also the correct operation of protection when an external fault occurs accompanied with CT saturation. Finally, the validity of criteria is verified based on PSCAD/EMTDC. The simulation results show that the criteria can operate quickly and the action time can be as short as 5.5 ms. And the protection can operate in one cycle after fault even if the percentage of interturn fault is only 0.5%. Besides, it has strong anti-CT saturation performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677108) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJQQ20161176).

**Key words:** transformer; similarity recognition for waveform; Hausdorff distance; interturn fault; CT saturation; double setting threshold

## 0 引言

近几年来随着区域电网不断互联, 电网的稳定

安全运行是经济发展的重要保证, 其中变压器作为电压变换的枢纽、电力传输的重要环节, 其正常工作对维护电网的稳定运行至关重要<sup>[1]</sup>, 然而, 变压器故障导致区域停电事件时有发生, 对电网的安全稳定造成了不利影响。据统计, 由于变压器绕组绝缘损坏导致的变压器油箱内部故障约占变压器故障

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51677108); 广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJQQ20161176)

的 70%~80%<sup>[2]</sup>, 其中匝间短路故障占比 50%以上<sup>[3-4]</sup>。当变压器油箱内故障时, 所产生的电弧不仅会损坏绝缘、烧毁铁芯, 而且绝缘材料和变压器油受热分解会产生大量气体, 有可能引起油箱爆炸。油箱爆炸所带来的后果将不仅使检修周期增大, 甚至会危害到人身财产安全。在变压器发生故障时, 保护装置能够快速准确地切除变压器, 阻止故障范围扩大, 是防止上述问题发生的有效途径。

目前, 差动保护是应用最为广泛的变压器主保护, 可用于防御绕组的各类相间、相地短路故障及严重匝间故障。该保护方案一般采用傅里叶变换提取基波分量, 而后将基波有效值与门槛值比较以判定保护是否动作。为满足高精度的计算要求, 傅里叶变换算法的数据窗长度一般至少取半个周波以上。而且, 原理上差动保护很难识别变压器内部轻微匝间故障, 通常当短路匝数低至 3%及以下时, 差动保护便无法准确辨识。针对很可能发生的轻微匝间短路故障, 目前通常采用瓦斯保护进行识别并预警。但无论是重瓦斯保护还是轻瓦斯保护, 达到其警戒值都需要时间进行热量和气体含量的积累, 故而动作延时较长, 其动作速度远低于电量保护<sup>[5]</sup>。更重要的是, 在此延时过程中, 故障很可能进一步扩大, 由轻微故障发展为严重故障, 造成变压器不可逆的损伤, 导致检修周期增长, 停电范围扩大等恶劣后果。此外, CT 饱和也一直是困扰差动保护的一大难题<sup>[6-7]</sup>, 当区外故障伴随 CT 饱和时, 会产生虚假差流, 引发主保护误动作。

为解决上述问题, 国内专家学者进行了大量研究并提出了相应的解决方案<sup>[8-12]</sup>。文献[8]针对变压器匝间短路问题, 提出将短路绕组等效成两个不同绕组的分析方案, 为研究灵敏的变压器匝间故障识别方案提供了理论基础。文献[9]分析了变压器匝间短路时两侧变比的变化, 并以此为特征量, 进行变压器匝间故障的识别, 达到了较高的匝间短路识别精度。但由于其未考虑 CT 饱和对保护性能的影响, 当变压器区外故障导致 CT 饱和时, 变比势必会发生变化, 继而很可能引起判据误动。因此, 有必要进一步研究更为优越的保护算法。

Hausdorff 算法是一种快速波形相似度比较算法, 现已经广泛应用在医学领域<sup>[13]</sup>。该算法具有原理简单, 对于波形之间的差异识别灵敏度高的优点, 目前已初步应用在继电保护领域<sup>[14-18]</sup>, 本文进一步探究了其在变压器快速保护方面的应用, 研究了变压器高低压侧电流的 Hausdorff 距离在不同场景下的变化规律, 提出了一种基于 Hausdorff 距离的变压器主保护判据。新判据无需对采样数据进行傅里

叶变换, 仅需对比数据窗内波形的相似度即可对故障进行甄别, 因此数据窗长度可以任意调节, 以达到快速识别严重的变压器内部故障的目的, 且针对 0.5%以上的轻微匝间短路也可在故障后一周波内切除, 此外, 该判据还具有较强的抗 CT 饱和能力。最后本文通过仿真试验, 验证了新判据的可靠性和有效性。

## 1 基本原理

### 1.1 基于 Hausdorff 距离的波形相似度识别的基本原理

Hausdorff 距离是一种度量两组点集之间相似程度的方法, 是一种描述两点集之间距离的形式, 设有两个有限点的集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_p\}$  和  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_q\}$ , 则这两个点集之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

$$h(A, B) = \max_{a_i \in A} \min_{b_j \in B} \|a - b\| \quad (2)$$

$$h(B, A) = \max_{b_j \in B} \min_{a_i \in A} \|a - b\| \quad (3)$$

式中:  $\|\cdot\|$  表示两点之间的欧式距离;  $h(A, B)$  称为  $A$  到  $B$  的单向 Hausdorff 距离, 其定义为: 对点集  $A$  中的每个点, 都可以在点集  $B$  中找到距离其最近的点, 即存在

$$\|a_i - b_j\| < \|a_i - b_k\| (1 \leq k \leq q \text{ 且 } k \neq j) \quad (4)$$

同理,  $h(A, B)$  为  $B$  到  $A$  的单向 Hausdorff 距离。根据式(1)可知, 通常  $h(A, B) \neq h(B, A)$ 。双向 Hausdorff 距离  $H(A, B)$  是  $h(A, B)$  和  $h(B, A)$  中的较大值, 用以度量两个点集之间的最大不匹配度。

Hausdorff 距离以图像特征点为对象, 不考虑图像之间的微小差别, 而是度量两组点集之间的整体特性差异。在现代电力系统中, 互感器二次侧所采集的电气量都是离散时间序列, 其横坐标为时间, 纵坐标为该电气量的幅值。每一个电气量数据点都相当于图形的某个特征点, 不同的波形构成不同的点集, 可直接用于计算 Hausdorff 距离。两波形的 Hausdorff 距离  $H(A, B)$  越大, 说明波形差异越大, 反之说明波形差异越小。因此, 研究利用电量采样值信息计算 Hausdorff 距离的变压器保护新原理具有很强的理论基础及可行性。

### 1.2 不同工况下变压器两侧电流的 Hausdorff 距离特征

1) 正常运行及区外故障未伴随 CT 饱和

为了提高变压器的工作效率, 我国容量 160 kVA

及以上的变压器至少存在一侧为三角形连接<sup>[19]</sup>，下文以 Ynd 型变压器为基础进行分析。

在微机保护中，通常直接采集线电流并将其引入保护装置，图 1 为变压器保护中 CT 连接电路的示意图。考虑到变压器各侧绕组连接方式不同，若要对两侧电流进行波形相似度比较，需在微机保护装置中对星型侧测量电流进行如下变换<sup>[20]</sup>：

$$\begin{aligned} \dot{i}_{yA} &= -N(\dot{i}'_{yA} - \dot{i}'_{yB}) \\ \dot{i}_{yB} &= -N(\dot{i}'_{yB} - \dot{i}'_{yC}) \\ \dot{i}_{yC} &= -N(\dot{i}'_{yC} - \dot{i}'_{yA}) \end{aligned} \quad (5)$$

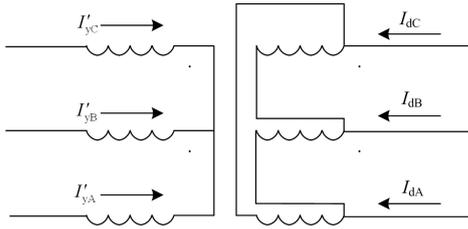


图 1 变压器两侧电流示意图

Fig. 1 Current diagram on both sides of the transformer

根据基尔霍夫电流定律，变换后的电流满足：

$$\begin{aligned} \dot{i}_{yA} &= \dot{i}_{dA} \\ \dot{i}_{yB} &= \dot{i}_{dB} \\ \dot{i}_{yC} &= \dot{i}_{dC} \end{aligned} \quad (6)$$

由此可知，无论是变压器正常运行还是外部故障工况，理论上经过变换后的星型侧电流  $\dot{i}_{yA}$ 、 $\dot{i}_{yB}$  和  $\dot{i}_{yC}$  分别与三角侧电流  $\dot{i}_{dA}$ 、 $\dot{i}_{dB}$  和  $\dot{i}_{dC}$  的波形完全相同，因此无论数据窗长度取为多少，对应的 Hausdorff 距离均为零。

### 2) 变压器区内故障

当变压器发生内部故障时，原变压器三相对称状态被打破，由式(5)变换所得的星型侧电流与三角侧电流不再满足等式(6)，具体分析如下。

变压器发生匝间短路时，实际上等同于变压器绕组的变比发生变化，此时式(5)中的  $N$  应改为  $N'$  才能保证等式(6)成立， $N'$  为考虑短路匝数后该相绕组的等效变比。而实际上保护装置的算法仍沿用短路前的变比  $N$ ，因此经过变换后的星型侧电流与三角侧线电流波形不再重合。短路匝数越多， $N'$  与  $N$  差距越大，两侧电流波形的差异越大，其 Hausdorff 距离越大。

当变压器绕组发生单相接地短路和相间接地短路时，变压器的等效网络结构发生变化，改变后的

等效拓扑与故障类型以及故障位置有关，对应的 KCL 方程也发生变化而同样不再呈现式(6)的关系。因此星型侧电流波形与三角侧电流波形亦会出现较大差异，导致 Hausdorff 距离增大。故障越严重，变换后两侧电流波形差异越大，Hausdorff 距离相应也越大。

### 3) 变压器区外故障伴随 CT 饱和

当发生变压器区外故障时，受直流分量的影响，很可能导致 CT 饱和，进而产生虚假差流，导致差动保护误动作。

图 2(a)为电流互感器等效电路图，理论上电流互感器工作时，二次侧短路，CT 未饱和时，励磁电感很大，励磁电流几乎为零。CT 饱和后，励磁电感  $L_m$  变小，励磁阻抗  $Z_m$  变小，励磁支路分流增大，二次侧采样电流波形发生畸变，出现间断角，如图 2(b)所示。直流分量越大，CT 饱和深度越深<sup>[21]</sup>。随着电流正负交替，CT 交替性工作在饱和与非饱和状态，即总存在一段时间使得 CT 工作于线性转变区。但是，为满足计算精度的要求，传统傅里叶变换的数据窗通常取半个周波(10 ms)以上，难以对深度饱和和情况下，短暂的线性转变区的有效信息加以利用。而 Hausdorff 距离算法的数据窗长度可任意调整，因此当数据窗长度小于线性转变时间时，算法即可有效利用线性转变区的正确转变信息。

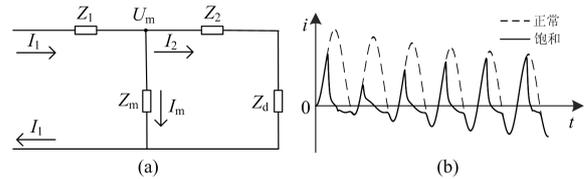


图 2 电流互感器等效电路图及饱和相电流

Fig. 2 CT equivalent circuit diagram and saturation phase current

虽然 CT 饱和会带来两侧转变特性的极度不一致，导致原本近乎吻合的两个电流波形差异增大，对应的 Hausdorff 距离变大。但是只要沿时间轴滑动的数据窗全部位于线性转变阶段，则窗内两波形仍然呈现几乎吻合的状态，其 Hausdorff 距离也会降低至零附近。该特征可用于识别伴随 CT 饱和的区外故障，因此基于 Hausdorff 距离的变压器保护新判据具备较高的抗饱和能力。

### 4) 变压器区内故障伴随 CT 饱和

根据图 2(b)饱和区域 CT 转变的特点，当 CT 工作于饱和区时，在励磁支路分流的影响下，电流的瞬时值趋于减小。内部故障时，变压器两侧的正常电流相位近似反向，因此饱和情况下一侧电流减小会导致两波形的 Hausdorff 距离减小，但最小也

不会降至零附近。当 CT 处于线性传变区时, CT 能正确传递电流信息, 不会影响两侧波形的 Hausdorff 距离计算, 因此基于 Hausdorff 距离的保护判据的决策不会受到影响。

## 2 基于双门槛的变压器内部故障的识别方法

根据前文的分析可以发现, 不同变压器工况下的 Hausdorff 距离可按特点分为以下四类: ① 变压器两侧波形一致, 即相同波形的比较, Hausdorff 距离长期位于 0 附近; ② 变压器两侧波形几乎相反, Hausdorff 距离长期处于高水平; ③ 在一个周波内, 存在某阶段 Hausdorff 距离下降至 0 附近; ④ 在一个周波内, 变压器两侧波形的 Hausdorff 距离变化幅度较大, 一段时间处于相对较低水平(非 0 附近)而另一段时间处于较高水平。图 3 为以上 4 种状态 Hausdorff 距离的示意图。

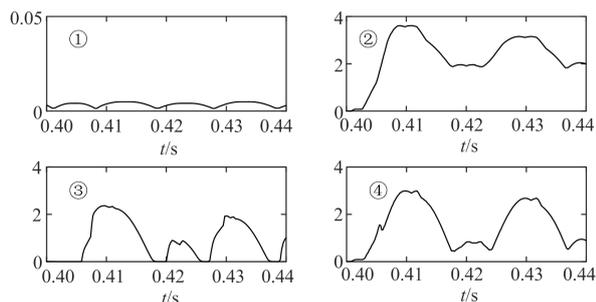


图 3 4 种 Hausdorff 距离随时间变化序列示意图

Fig. 3 Schematic diagram of four Hausdorff distances

根据上述结论可以发现, 若仅根据 Hausdorff 距离与某一特定较低的门槛值进行比较, 以区分区内故障和区外故障伴随 CT 饱和工况, 则至少需要一个周波的时间才能完成判断。若可以找到另外一个较高的门槛值, 实现区外故障伴随 CT 饱和情况和较严重区内故障的快速辨识, 则可极大提高变压器保护响应严重区内故障的速动性; 而针对较轻微的区内故障(如 0.5% 的匝间故障), 较低的门槛值也可保证其在故障后一周波内准确出口动作。这样既保证了保护抗 CT 饱和的能力又不降低算法响应匝间故障的灵敏性。

上述双门槛的整定方法如下。

### 1) 低整定门槛值 $H_{set1}$

$H_{set1}$  用于识别变压器区内故障和非区内故障(不含 CT 饱和)两类工况, 目的是保证保护判据在非区内故障情况下不会误动。因此应以变压器正常工作和变压器区外故障工况下, 数据窗内 Hausdorff 距离的最大值  $H_{max1}$  为最低标准, 以保证保护判据不会误动, 确保其可信赖性。同时, 考虑相应的可

靠系数  $K_{rel1}$ , 则  $H_{set1} = H_{max1} \times K_{rel1}$ ,  $K_{rel1}$  可取为 1.15~1.3。

### 2) 高整定门槛 $H_{set2}$

$H_{set2}$  用于应对变压器区外故障伴随 CT 饱和和导致 Hausdorff 距离增大的情况, 其目的亦是提高保护的可靠性, 确保保护在复杂的区外故障场景下不会误动, 同时兼具加快严重变压器区内故障情况下保护动作速度的作用。因此整定原则以区外故障伴随 CT 饱和工况下, 测得的最大 Hausdorff 距离为标准。设区外故障使得流经变压器保护区的故障电流最大, 同时变压器保护区内 CT 发生极度饱和和这一最严苛的情况下, Hausdorff 距离为  $H_{max2}$ , 考虑可靠系数  $K_{rel2}$  后,  $H_{set2} = H_{max2} \times K_{rel2}$ 。

数据窗越长, 窗内的数据越多, 计算结果对波形吻合程度的描述越精准, Hausdorff 距离随时间变化越平滑, 但是计算量也会相应增加。考虑到较为严重的饱和情况后, 本文选取数据窗长度为 1/8 周波(2.5 ms), 从而保证充分利用 CT 饱和情况下有限的有效数据。以单个采样点为单位向前推移数据窗, 可以得到一系列随时间变化的 Hausdorff 距离序列, 将每个数据窗内的 Hausdorff 距离与两个门槛值进行比较, 以判断保护是立即跳闸, 还是观察一周波后再确定是否跳闸。现提出变压器内部故障快速识别方法如下。

(1) 根据变压器各侧绕组的连接方式, 结合变压器的变比, 对星型侧电流进行变换, 并以正常工作情况下的电流为基准值进行标么。

(2) 实时采集数据窗内高低压侧电流波形的 Hausdorff 距离, 并与门槛值  $H_{set1}$  和  $H_{set2}$  进行比较。

(3) 当 Hausdorff 距离始终低于  $H_{set1}$  时, 判断未发生变压器区内故障, 保护不动作。

(4) 当某时刻数据窗对应的 Hausdorff 距离超过门槛值  $H_{set1}$  后, 则判断有可能发生了变压器内部故障。

(5) 在检测到 Hausdorff 距离超过门槛值  $H_{set1}$  后的一个周期内, 持续滑动数据窗, 一旦所对应的 Hausdorff 距离超过了门槛值  $H_{set2}$ , 则确定发生了变压器内部故障, 且故障较为严重, 保护即刻动作切除故障。

(6) 若在检测到 Hausdorff 距离超过门槛值  $H_{set1}$  后的一个周期内, 始终未检测到距离值超过  $H_{set2}$ , 此时分为两种情况: ① Hausdorff 距离始终处于  $H_{set1}$  以上, 则判断为发生了较为轻微的内部故障, 保护在一周波后跳闸; ② 一周波内, 存在某一时刻 Hausdorff 距离降低至门槛值  $H_{set1}$  下, 则判断为变压器区外故障伴随 CT 饱和, 保护不动作。

下文提到的变压器各侧电流波形均为经式(5)计算后的电流,不再赘述。

具体的保护判据流程图如图 4 所示。

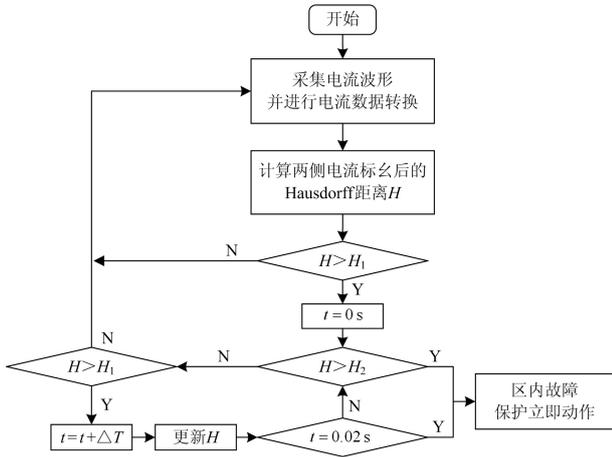


图 4 变压器主保护流程图

Fig. 4 Flow chart of transformer main protection

### 3 仿真验证

在 PSACD/EMTDC 中搭建图 5 所示的仿真模型,采用 38.5/220 kV 电力变压器,容量为 100 MVA,漏抗为 0.2 p.u.,铜耗为 0.02 p.u。电源为等效系统阻抗  $Z = 27.5 \angle 85^\circ \Omega$  的 220 kV 电压源,频率为 50 Hz。采样频率为 4 kHz。针对以下几种场景对所提方法进行有效性验证。高低门槛分别设为 2.5 和 0.05。

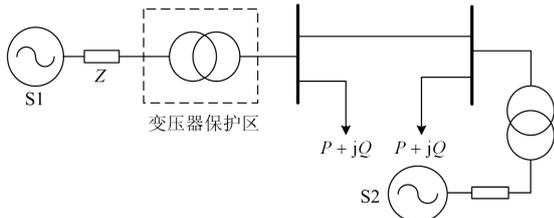


图 5 38.5/220 kV 变压器模型

Fig. 5 38.5/220 kV transformer model

#### 3.1 严重匝间短路

假设高压侧 A 相绕组在 0.4 s 时发生较为严重的匝间短路故障,故障匝数为 7%,此时变压器高低压侧的仿真波形以及 Hausdorff 距离序列波形如图 6 所示。根据理论分析可知,匝间短路实际为变压器的变比发生变化,因此依照故障前变压器变比换算得到的两侧电流波形不再重合,而是出现较大的差异, Hausdorff 距离最大约 2.6,超过高整定门槛值 2.5,此时不再对之后数据窗内波形的 Hausdorff 距离进行判断,保护即刻动作。需要特别说明的是, Hausdorff 距离随时间呈现准周期性变化,是数据窗长度小于工频周期所造成的,但理论分析及仿真结

果表明,在所选取整定门槛值下,其并不会影响保护算法的判断结果。

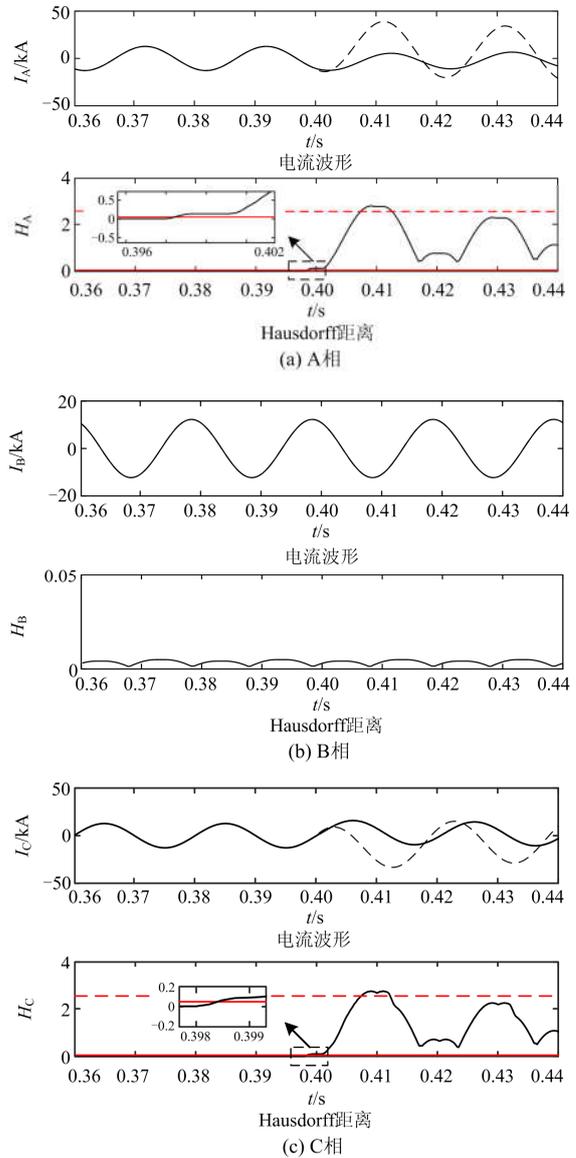


图 6 较严重匝间故障时的三相电流波形及 Hausdorff 距离序列波形

Fig. 6 Waveform of three-phase current waveform and their Hausdorff distance when severe interturn fault occurs

根据仿真结果可知,在故障发生后 7 ms,两侧电流波形的 Hausdorff 距离超过高门槛  $H_{set2}$ 。若采用差动保护(数据窗选为半个周波),动作时间为 9.6 ms,因此在处理严重的匝间故障方面,新判据的速动性略微优于传统的差动保护。C 相电流波形的仿真分析结果与 A 相近似;而对于 B 相,星型侧换算得到的 B 相电流不受故障相的影响,因此 B 相两侧电流波形的 Hausdorff 距离始终低于低门槛值。本文设定的保护动作逻辑为只要存在某一相判定为

变压器内部故障时, 即跳开三相断路器, 切除变压器, 因此 B 相的分析结果并不会影响变压器保护判据的速动性。

除此之外, 通过对比各相的 Hausdorff 距离可以发现, B 相电流的 Hausdorff 距离始终处于低门槛值以下, 而 A、C 两相的 Hausdorff 距离均处于低门槛以上, 再结合星型侧电流换算式(5)可知, B 相的各侧电流不受 A 相(故障相)电流影响, 据此可进一步推出发生匝间短路的相别为 A 相, 在进行变压器检修时, 可重点对 A 相绕组进行检查。

### 3.2 轻微匝间短路

变压器高压侧 A 相绕组在 0.4 s 时发生轻微的匝间短路故障, 短路匝数为 0.5%。当前工况下, 变压器两侧的 A 相电流波形及其 Hausdorff 距离随时间变化关系如图 7 所示。观察图 7 可以发现, 由于短路匝数较少, 变压器变比的变化相对较小, 故障后变压器两侧 A 相绕组电流的波形差异与严重匝间故障情况相比较小, 此时仿真表明, Hausdorff 距离最大为 0.16, 远低于高门槛值 2.5, 因此保护装置将会持续判断一周波。在这一周波内, 始终未出现 Hausdorff 距离小于低门槛值 0.05 的情况, 故保护判据判定发生变压器内部故障, 在 0.42 s(故障后 0.02 s)保护跳闸, 切除变压器。

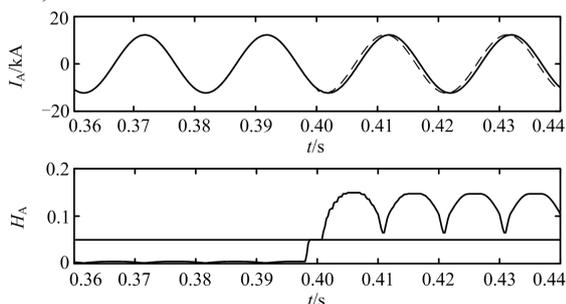


图 7 轻微的匝间短路故障时, A 相电流波形及其 Hausdorff 距离波形

Fig. 7 waveform of phase A current waveform and their Hausdorff distance when low percentage interturn fault occurs

其余两相波形的 Hausdorff 距离分析同算例 3.1 节一致, 不再赘述。若采用差动保护, 则该工况下差动电流过小不足以超过差动保护的制动门槛, 因此无法对故障进行识别, 只能依靠瓦斯保护动作或者匝间故障扩大到足以触发差动保护, 断路器才会跳闸。篇幅所限其余各相波形及差动电流波形不再以图表的形式给出, 下同。

### 3.3 变压器内部单相接地故障

变压器高压侧 A 相绕组在 0.4 s 时发生单相接地故障, 此时 A 相电流波形及其 Hausdorff 距离随时间变化关系如图 8 所示。两侧电流波形不再满足

式(5), 经过相应变换后的两电流波形差异非常大, Hausdorff 距离最大为 3.7, 超过了高门槛值 2.5, 因此在变压器故障发生后 5.5 ms, 保护出口动作, 切除故障。同样, 若是采用差动保护作为主保护, 则故障后约 10 ms, 保护装置才会发出跳闸命令, 其动作速度低于本文所提出的保护判据。

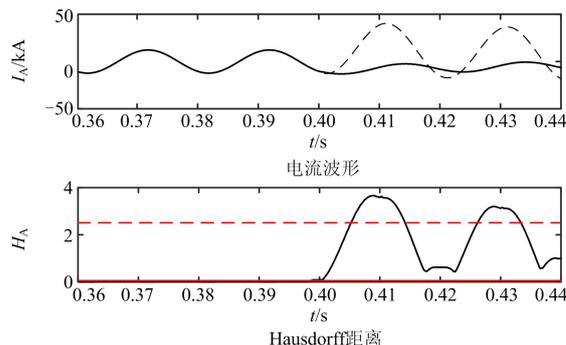


图 8 变压器内部单相短路故障时的电流波形及其 Hausdorff 距离序列波形图

Fig. 8 Waveform of current waveform and their Hausdorff distance when low percentage interturn fault occurs

改变故障类型, 进行大量的仿真计算, 仿真结果表明, 本文所提判据可以有效识别各种类型的变压器内部故障(匝间短路故障的短路比大于等于 0.47%)。

### 3.4 区外故障

图 9 为发生区外故障时变压器两侧 A 相电流波形, 由图可知, 0.4 s 时发生变压器区外故障, 经过式(5)变换后的两侧电流波形几乎重合, 其对应的 Hausdorff 距离近似为 0, 一直未超过低门槛值 0.05。其余两相的仿真结果与 A 相相同, 两侧电流波形的 Hausdorff 距离均在低门槛以下, 保护不会动作。由此, 区外故障下保护的可靠性得以验证。

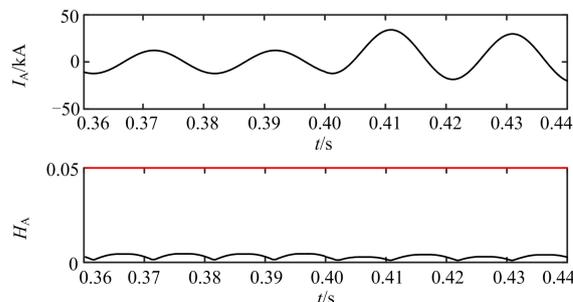


图 9 区外故障时 A 相电流波形及 Hausdorff 距离波形  
Fig. 9 Waveform of phase A current and their Hausdorff distance when external fault occurs

### 3.5 区外故障伴随 CT 饱和

设输电线路 A 相在电压过零点时发生单相接地故障, 故障点为线路首端, 此时短路电流中将会出现较大的直流分量, 极易引起 CT 饱和, 而且在故

障初期，直流分量最大，饱和最为严重。

图 10 为发生变压器区外故障且伴随 CT 饱和时，A 相两侧电流波形及其 Hausdorff 距离随时间的变化关系。由图可知，0.4 s 时发生区外故障，由于直流分量较大，引起严重的 CT 饱和。故障发生后 4 ms，CT 进入饱和，波形的 Hausdorff 距离开始增大并迅速超过低门檻值 0.05，在接下来的一周波内，Hausdorff 距离始终低于高门檻值 2.5，且在 0.417 s (故障发生后 17 ms，Hausdorff 距离首次超过低门檻值后的 13 ms)，Hausdorff 距离降至低门檻以下，此时保护判据将当前工况识别为伴随 CT 饱和的变压器区外故障，而不会发出跳闸命令。当饱和程度较为轻微时，Hausdorff 距离第二次低于低门檻值的出现时间将会更早，同样不会造成保护误动作。可见，本文所提方案具有极强的抗 CT 饱和能力，优于传统的差动保护。

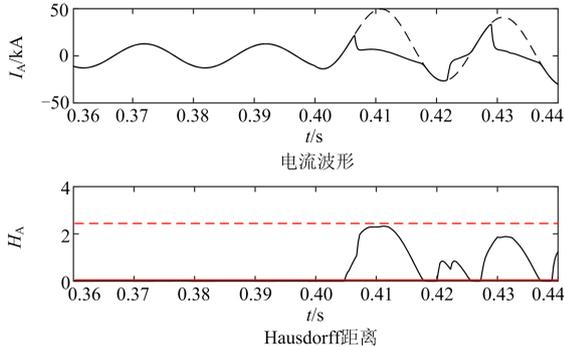


图 10 区外故障伴随 CT 饱和工况下 A 相电流及其 Hausdorff 距离随时间变化关系

Fig. 10 Waveform of phase A current and their Hausdorff distance when external fault occurs accompanied with CT saturation

### 3.6 区内故障伴随 CT 饱和

变压器区外故障不仅会造成 CT 饱和，当变压器区内故障较为严重，或者故障电流中的直流分量较大时，也可能会出现 CT 饱和的情况。

设 0.4 s 时变压器 A 相绕组在电压过零点时发生单相接地故障，两侧 A 相电流波形及其 Hausdorff 距离随时间变化波形如图 11 所示。由图可见，在故障发生后 2 ms，CT 开始饱和，高压侧波形出现畸变。在 0.408 s(故障后 8 ms)Hausdorff 距离超过高门檻值 2.5，最高可达 2.9，因此判据不会持续判断一周波而在故障后 8 ms 即可出口动作。

需要特别说明的是，针对不同程度的饱和，可能存在饱和侧波形与未饱和侧波形的 Hausdorff 距离低于高门檻值，但是该 Hausdorff 距离始终位于低门檻值以上，因此即使在最不利的工况下，保护也可在故障后一周波内跳闸，切除故障。篇幅所限，此类工况不再以图表的形式给出。

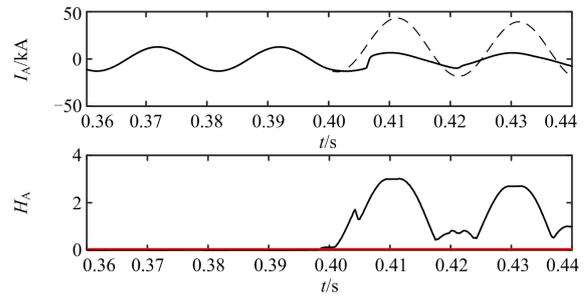


图 11 变压器区内故障导致 CT 饱和时 A 相电流波形及其 Hausdorff 距离波形

Fig. 11 Waveform of phase A current and their Hausdorff distance when internal fault occurs accompanied with CT saturation

## 4 结论

针对传统变压器的主保护——差动保护识别匝间故障能力较弱，且不具备抗 CT 饱和能力的缺陷，提出一种基于 Hausdorff 距离的变压器主保护新判据。该判据根据高低压侧电流波形的相似程度判断变压器内部是否发生故障，并通过仿真验证了所提判据的可靠性。现得出结论如下：

- 1) 新判据的数据窗长可以任意选取，为提高保护动作速度提供有利条件；
- 2) 双门檻值中的高门檻确保保护在较为严重的变压器区内故障时，可以迅速动作，且动作速度快于传统的差动保护；
- 3) 新判据具有较强的响应匝间故障的能力，可识别短路匝数比低至 0.5% 的轻微匝间故障，且在故障发生后一周波内即可准确跳闸，切除故障。
- 4) 低门檻值使新判据具有很强的抗 CT 饱和能力，即使是在严重的区外故障伴随 CT 饱和工况下，保护也能准确识别并可靠不动作，避免发生保护误动的情况。

## 参考文献

[1] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 90-96.  
ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.

[2] BENGTSOON C. Status and trends in transformer monitoring[C] // IEEE 1995 Powertech Conference Proceedings, August 1995, Stockholom, Sweden: 1379-1384.

[3] 徐岩. 电力变压器内部故障数字仿真及其保护新原理的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.

[4] 王楠, 杨洪, 刘宝成. 35 kV 变压器匝间短路故障分析

- [J]. 变压器, 2013, 50(10): 60-64.  
WANG Nan, WANG Hong, LIU Baocheng. Analysis of interturn short circuit fault in 35 kV transformer[J]. Transformer, 2013, 50(10): 60-64.
- [5] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2007 年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 5-8.  
SHEN Xiaofan, SHU Zhihuai, LIU Yu, et al. Operation situation of protective relays of State Grid Corporation of China in 2007[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 5-8.
- [6] 赵启元, 石径. 一起由于 CT 饱和造成主变差动保护误动作的故障分析[J]. 青海电力, 2009, 28(增刊 2): 62-65.  
ZHAO Qiyuan, SHI Jing. Failure analysis on false-actions of differential protection main transformer for CT saturation[J]. Qinghai Electric Power, 2009, 28(S2): 62-65.
- [7] 金瑞, 鲍斌, 时伯年. 变压器差动保护的三种比率制动方式及其系数整定的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 81-87.  
JIN Rui, BAO Bin, SHI Bonian. Research on three kinds of percentage restraint methods and their coefficient setting of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 81-87.
- [8] 杨理才, 孙结中, 刘蔚, 等. 变压器匝间短路建模及其实际应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 140-145.  
YANG Licai, SUN Jiezhong, LIU Wei, et al. Transformer inter-turn short circuit modeling and its application[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 140-145.
- [9] 熊小伏, 王婧, 陈星田. 一种基于电流比变化量的变压器匝间短路保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 112-115.  
XIONG Xiaofu, WANG Qiang, CHEN Xingtian. A protection method of transformer inter-turn short circuit based on the variation of current ratio[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 112-115.
- [10] OLIVARES-GALVAN J C, ESCARELA-PEREZ R, GONZALEZ J A A, et al. Detection of interturn faults during transformer energization using wavelet transform[C] // IEEE International Autumn Meeting on Power, November 9-11, 2017, Ixtapa, Mexico: 178-182.
- [11] 朱声石. 变压器轻微匝间故障的保护[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(1): 25-29.  
ZHU Shengshi. Transformer protection for low percentage interturn faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(1): 25-29.
- [12] 郑玉平, 刘小宝, 俞波, 等. 基于有功损耗的自适应变压器匝间保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 104-107.  
ZHENG Yuping, LIU Xiaobao, YU Bo, et al. A method of adaptive transformer turn-turn fault protection based on power loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 104-107.
- [13] 远国. 心电波形的检测与分类技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [14] WANG A, SUN X, ZHOU X, et al. Difference squared Hausdorff distance based medical image registration[C] // 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2011, Mianyang, China: 4270-4272.
- [15] GUO Qianwen, CHEN Le, XIE Jianxiang, et al. A novel robust magnetizing inrush fast identification criterion based on partial hausdorff distance[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA: 271-275.
- [16] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027.  
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027.
- [17] 翁汉琮, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483.  
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483.
- [18] 赵航, 林湘宁, 喻焜, 等. 基于模量 Hausdorff 距离波形比较的直流输电线路选择性快速保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6888-6900.  
ZHAO Hang, LIN Xiangning, YU Kun, et al. A high-speed protection scheme for HVDC transmission line based on Hausdorff distance comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6888-6900.
- [19] 赵莉华, 曾成碧, 苗虹. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [20] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [21] 吕宁. 变压器差动保护中励磁涌流和 CT 饱和问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-05-08

作者简介:

吴梓亮(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护相关研究和管理; E-mail: wu\_ziliang@foxmail.com

曾耿晖(1977—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与管理; E-mail: gdrelay@163.com

李一泉(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与管理。E-mail: topiceman1@sina.com

(编辑 许威)