

DOI: 10.7667/PSPC180043

一种基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流识别新方法

郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴

(广州供电局电力试验研究院, 广东 广州 510054)

摘要: 变电站的电磁环境较为复杂, 二次设备可能受到电磁干扰等不利因素影响而产生异常数据, 进而导致保护误动。传统的变压器励磁涌流识别方法并没有考虑到异常数据干扰对保护的影响。分析异常数据对不同识别方法造成的影响, 可以得知现有的励磁涌流识别方法在保护用数据受到异常干扰时, 可能会导致保护动作速度变慢甚至保护误动。为解决这一问题, 提出了一种基于波形相似度识别的励磁涌流快速识别方法, 通过对比差动电流和正弦信号的波形相似度以区分励磁涌流和故障电流。仿真结果表明, 该方法能够快速有效识别励磁涌流, 在一定程度上能够不受异常数据的影响。

关键词: 励磁涌流; 异常数据; 相似度识别; Hausdorff 距离

A new method of inrush current identification based on partial Hausdorff distance

GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing

(Tests and Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510054, China)

Abstract: The electromagnetic environment of the substation is more complex, secondary equipment may be affected by electromagnetic interference and other factors, which will produce false data and thus lead to protection misoperation. However, conventional methods of transformer inrush current identification do not take into account the influence of false data interference on protection. By analyzing the influence of false data on different methods, it can be concluded that existing methods may slow-operate even mal-operate. To solve this problem, a new magnetizing inrush identification method based on similarity identification is proposed. The magnetizing inrush current and fault current are identified by comparing the waveform similarity between the detected current and the sinusoidal signal. Simulation results show that this method can identify inrush current quickly and effectively, and it can not be affected by false data to a certain degree.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. GZHKJXM20160038).

Key words: inrush current; false data; similarity identification; Hausdorff distance

0 引言

随着变电站智能化程度不断提高, 二次设备逐渐趋向于一、二次集成化发展^[1-2]。在这种趋势下, 二次设备更加靠近一次设备所在的开关站, 越发容易受到复杂电磁环境的影响, 对其采样和通信造成干扰, 进而产生异常数据, 对相关保护造成影响。据统计, 近年来不断发生多起由于异常数据所引发的保护误动案例^[3-4]。虽然可以通过提高硬件水平、改进软件技术来减少异常数据的产生, 降低对保护

性能的影响。然而, 考虑到异常数据并不能完全被消除, 个别异常数据仍可能存在这一现实状况, 采取措施来解决这一问题是十分必要的。

变压器在投入电力系统时, 可能产生的励磁涌流会影响到变压器差动保护的安全性^[5], 异常数据的出现使其变得更为复杂。现有的励磁涌流的识别和抑制方法大多基于二次谐波闭锁判据^[6-9]、时差法^[10-13]、小波算法及形态学原理^[14-17]、信息熵算法^[18]等。尽管上述这些方法已经在工程实际应用中已被验证能够有效地识别和抑制励磁涌流, 但事实上依然没有考虑异常数据的影响。当在区内发生故障并伴随异常数据时, 差动电流的二次谐波比例会有所增加, 这可能导致基于二次谐波的闭锁判据误闭锁差

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477090); 南方电网公司科技项目资助(GZHKJXM20160038)

动保护,造成差动保护动作延时。在变压器合闸时,基于线电流和差动电流突变时间差的涌流识别方法——时差法(TDM)能够快速准确地区分由励磁涌流或区内故障引起的差动电流。然而,在变压器合闸和涌流产生的时差内,任何出现的异常数据都可能使正常的变压器合闸被误判为区内故障,进而导致保护误动。此外,异常数据的出现对于基于不同形态学的涌流识别方法的影响也不同,基于积分法以及空间面积法原理的方法更容易受到异常数据干扰的影响。为了解决这一问题,文献[19]提出了一种基于波形对称原则的识别励磁涌流和区内故障的方法,可以应对异常数据干扰的问题。其通过计算一个工频周期内电流随时间变化的倒数,并将前后两个半周期的相应数据进行比较,以此识别区内故障或励磁涌流引起的差动电流。上述方法虽然能够减小异常数据的影响,但是由于需要提取一个完整周期的数据来保证保护的可靠性,故其通常的跳闸动作时间长于 20 ms,不符合保护速动性的要求。

鉴于文献[19]所提出的波形相似度识别算法具备抗异常数据干扰的优越性,本文提出了一种基于部分 Hausdorff 距离的变压器励磁涌流识别新方法。通过对比半个工频周期数据窗中差动电流和正弦信号的相似度,辨识区内故障和励磁涌流的差动电流。该方法不但能在一定程度上避免异常数据的影响,而且由于仅需要半个周期的数据,其跳闸速度可以提升到 10 ms,通过实验仿真验证了该方法的有效性。

1 波形相似度识别算法

1.1 Hausdorff 距离原理

Hausdorff 距离用来描述两组点集之间的相似程度,假设有两个有限点的集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_p\}$,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: $\|\bullet\|$ 表示两点之间的欧式距离; $h(A, B)$ 为向前 Hausdorff 距离,对点集 A 中的每个点,在点集 B 中都有与其距离最近的点,即存在 $\|a_i - b_j\| < \|a_i - b_k\| (1 \leq k < j \text{ 且 } k \neq j)$ 。同理, $h(B, A)$ 为向后 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,用以表述两个点集之间的最大不匹配度。在此基础上,引入有限点集的部分 Hausdorff 距离。

$$h^f(A, B) = \max_{a_i \in A} f^{\text{th}} \min_{b_j \in B} \|a - b\| \quad (4)$$

式中: f^{th} 表示距离序列值,对于集合 B 中的每一个点,计算出到集合 A 中最近点的距离,再对 B 中的点根据其相应距离值进行排序。部分 Hausdorff 双向距离定义为

$$H(A, B) = \max(h^f(A, B), h^f(B, A)) \quad (5)$$

相比于式(1)中的 Hausdorff 距离,部分 Hausdorff 距离对于噪点的反应灵敏度有所降低。

1.2 抗异常数据原理

波形相似识别算法可以有效识别两个点集的差异,并且不受波形局部特征的影响。图 1(a)、图 2(a)和图 3(a)分别为相似波形、不同波形以及伴有异常数据的相似波形。图 1(b)、图 2(b)和图 3(b)为相应的按大小排序的最小距离序列。

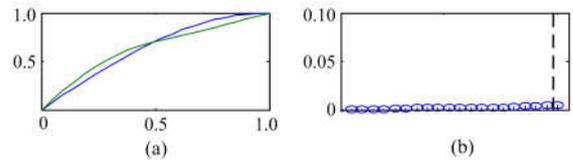


图 1 相似波形和相应的最小距离序列

Fig. 1 Similar waveform and corresponding minimum distance sequence

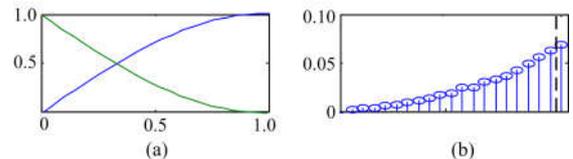


图 2 不同波形和相应的最小距离序列

Fig. 2 Dissimilar waveform and corresponding minimum distance sequence

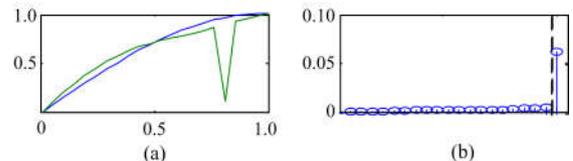


图 3 伴有异常数据的相似波形和相应的最小距离序列
Fig. 3 Similar waveform with false data and corresponding minimum distance sequence

由图 1 可以看出,对于相似波形,最小距离序列的所有点都近似为 0。由图 2 可以看出,不同波形之间的最小距离序列点呈现单调递增的趋势,且相邻点之间的差值不大,存在一定的连续性。由图

3 可以看出, 在伴有异常数据的相似波形中, 当出现了异常数据时, 相应地在最小距离序列中出现了最大值, 而其余所有的最小距离序列都接近于 0。

式(4)、式(5)中的指数 f 是抗异常数据干扰设计中的关键指标。当 $f=1$ 时, 通过计算双向最小距离中的最大值获得部分 Hausdorff 距离, 呈现为图 1(b)、图 2(b)和图 3(b)的右端点。受异常数据干扰的影响, 图 3(a)波形计算的部分 Hausdorff 距离非常大, 借此可以准确判断出波形差异。当 $f < 1$ 时, 最大值被舍弃, 用剩余序列中的最小距离 f_{th} 代替。

通过舍弃最小距离序列中的较大值来识别区内故障, 可以避免由异常数据引起的差动保护误动。但是, 考虑到最小距离序列中的最大值可能低于整定门槛, 如果有较多值被舍弃, 可能会对保护的动作速度造成不利影响, 导致区内故障时未能及时跳闸。下文中, 保护算法采用半个工频周期的数据窗设计。考虑到即使在最严格的保护暂态干扰标准中, 一个工频周期内通常只考虑一个暂态干扰, 因此, 半个工频周期内考虑一个异常数据符合最高标准的要求。在 $1/4$ 周期内采样点的数量为 N , 通过设 $f=1-1/N$, 异常数据造成的最小距离序列中的最大值被舍弃(如图 3 中的虚线所示), 剩余的最小距离不受影响。

对于不同的波形, 即使丢弃最小距离序列中的最大值, 临近的最小距离仍然具有较大值, 保证了发生任何区内故障时, 差动保护仍然可以可靠动作。因此, 通过对不同差动电流进行识别, 基于部分 Hausdorff 距离的保护原理可以在励磁涌流发生时有效地对保护进行闭锁, 在发生区内故障时也能准确识别, 快速跳闸。

2 基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流识别方法

2.1 识别方法

结合第 1 节分析, 本文提出一种基于部分 Hausdorff 距离的变压器励磁涌流识别方法。

(1) 取故障元件的差动电流, 记录保护的启动时间为 t_0 。

(2) 确定差动电流采样值的极值点。首先, 利用差动电流采样值的前向比例系数来获得按大小排列的距离序列, 然后求微分, 依据微分的符号变化定位极值点, 将此极值点的相应时间记录下来定为 t_e 。

(3) 根据不同区间内的 t_e , 采用不同的数据转换方法。

a. 当 $t_0 < t_{e1} < t_0 + T/4$ 时, 记录数据窗 $(t_{e1}, t_{e1} + T/2]$ 内的数据和第二个极值点出现时间 t_{e2} 。将满

足 $t_{e2} < t < t_{e1} + T/2$ 的采样数据 (t, i) 按照式(6)进行数据转换。

$$\begin{cases} t = t - T/2 \\ i = i_{end} + i_{star} - i \end{cases} \quad (6)$$

式中, i_{end} 、 i_{start} 分别是数据窗的第一个和最后一个采样值, 转换数据后的数据窗是 $(t_{e2} - T/2, t_{e2}]$ 。

如图 4 所示, 对于内部故障, 第一个极值点通常在故障发生后不久出现, 但这并不是最大值。第一个和第二个极点之间的时间差小于半个工频周期, 转换后曲线 AB 变化为 $A'B'$ 。对于产生励磁涌流时的差动电流, 其极值点的准确时刻虽然无法确定, 但一定大于四分之一工频周期。

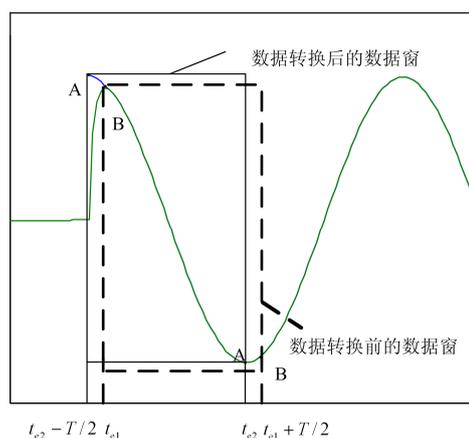
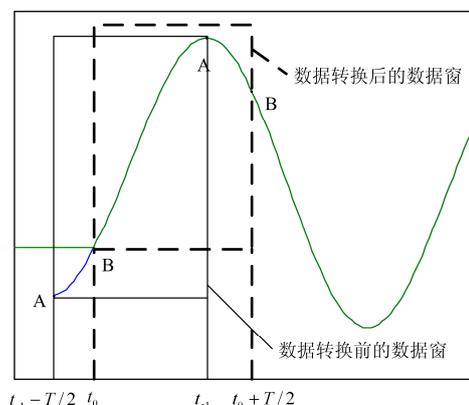


图 4 步骤 3.a 的数据转换

Fig. 4 Data conversion diagram of step 3.a

b. 当 $t_0 + T/4 < t_{e1} < t_0 + T/2$ 时, 记录 $(t_0, t_0 + T/2]$ 区间内数据。将满足 $t_{e1} < t < t_0 + T/2$ 的采样数据 (t, i) 按照式(6)进行数据转换, 转换数据后的数据窗是 $(t_{e1} - T/2, t_{e1}]$ 。

图 5(a)和图 5(b)分别是发生区内故障以及产生励磁涌流时的数据转换。其中, 图 5(a)的数据波形与正弦曲线相似, 图 5(b)则与之有明显的区别。



(a) 区内故障时的数据转换

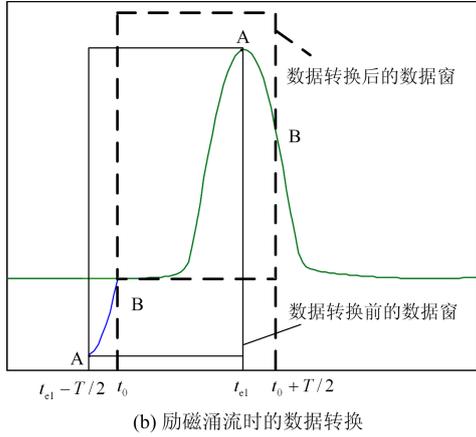


图 5 步骤 3.b 的数据转换
Fig. 5 Data conversion diagram of step 3.b

c. 当 $t_{cl} \geq t_0 + T/2$ 时, 直接记录 $(t_{cl} - T/2, t_{cl}]$ 的数据, 并不对其进行转换。

(4) 构造正弦模型。在使用部分 Hausdorff 距离算法之前, 必须对数据进行归一化处理。

$$t' = \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

$$i' = \frac{i - i_1}{i_2 - i_1} \quad (8)$$

式中: t_1 和 i_1 分别是数据窗的初始时刻和对应的电流采样值; t_2 和 i_2 分别是数据窗的结束时刻和对应的电流采样值。

根据式(9)构造正弦曲线模型。

$$i_s(t') = \pm \sin[100\pi \cdot t' + \pi/2] \quad (9)$$

式中: $i_1 > i_2$ 时, $i_s(t')$ 取正; $i_1 < i_2$ 时, $i_s(t')$ 取负。

(5) 通过比较转换处理后的采样数据和构造的正弦模型曲线, 得到部分 Hausdorff 距离 H 。将计算所得的 H 与整定值 H_{set} 进行比较, 当 $H \leq H_{set}$ 时, 差动电流与正弦模型信号相似度高, 可被判定为内部故障, 保护动作, 当 $H > H_{set}$ 时, 差动电流与正弦模型信号相似度较小, 其被判定为励磁涌流, 保护闭锁。保护方案流程图如图 6 所示。

(6) 对于剩下的极值点, 继续用时间 $(t_e - T/2, t_e]$ 内的数据计算其部分 Hausdorff 距离, 重复上述过程。

2.2 整定门槛设定

理论上, 当发生区内故障时, 其差动电流经过处理后的采样数据和正弦模型的部分 Hausdorff 距离应该无限趋近于 0。而对于变压器励磁涌流的差动电流, 其部分 Hausdorff 距离与间断角有关: 间断角越小, 涌流波形与正弦波的波形就越相似, 部分 Hausdorff 距离就越小。本文提出的方法为达到在任何励磁涌流的情况下都能有效闭锁变压器差动

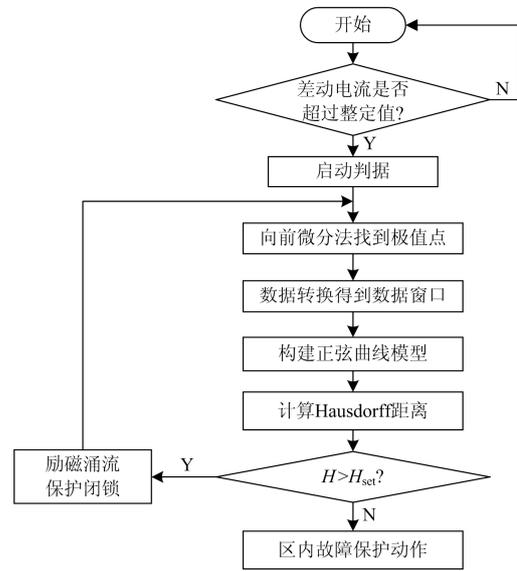


图 6 所提保护方案流程图
Fig. 6 Flowchart of the proposed criterion

保护, 整定门槛考虑在最严重励磁涌流条件下设定, 即 A、B、C 三相合闸角分别为 0° 、 -120° 、 120° , 剩磁分别为 0.9 p.u.、-0.9 p.u.、-0.9 p.u. 时同时合闸。整定门槛设定为该条件下计算的部分 Hausdorff 距离除以相应的可靠系数, 如式(10)。

$$H_{set} = \frac{H}{K_{rel}} \quad (10)$$

式中, K_{rel} 取 1.15~1.3。在最严重励磁涌流条件下仿真和上述可靠性系数的基础上, $f = 39/40$, H_{set} 设定为 0.087。只要有一相满足判据, 则整个差动保护就会闭锁。

3 仿真验证

在 PSACD/EMTDC 中搭建如图 7 所示的仿真模型, 采用 Yn/Δ 连接的 220/110 kV 电力变压器, 容量为 100 MVA, 漏抗为 0.1 p.u., 铜耗为 0.01 p.u.^[20]。电源为等效系统阻抗 $Z = 27.5 \angle 85^\circ \Omega$ 的 220 kV 电压源, 频率 50 Hz 采样频率为 4 kHz。在 6 种场景下对所提方法进行有效性验证。

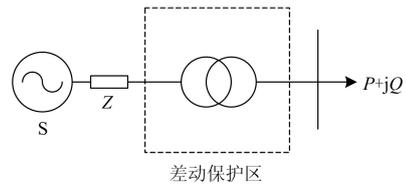


图 7 220/110 kV 变压器模型
Fig. 7 Model of 220/110 kV transformer

3.1 算例 1: 严重的励磁涌流场景验证

A、B、C 三相在 $t=0.4$ s 时闭合, 此时 A 相剩

磁为 0.9 p.u.。如图 8(a)所示, 涌流只在差动电流 I_{AC} 和 I_{BA} 出现, 两者形状相同, 极性相反。如图 8(b)所示, I_{AC} 和 I_{BA} 中的二次谐波含量变化趋势也相同, 两者同时降到 15%以下达到最小值, 根据传统励磁涌流的二次谐波闭锁判据(二次谐波制动系数为 15%), 此时保护开放, 有可能发生误动。如图 8(c)所示, 利用 I_{AC} 和 I_{BA} 计算所得的部分 Hausdorff 距离均大于整定门槛, 满足识别为励磁涌流的保护判据, 能够对其进行有效闭锁, 不会发生保护误动。

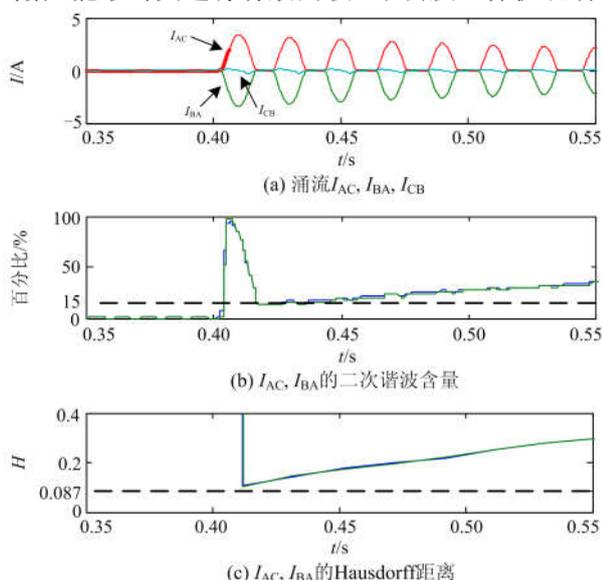


图 8 严重励磁涌流下的二次谐波含量和 Hausdorff 距离

Fig. 8 Severe inrush, corresponding second harmonic ratio and Hausdorff distance

3.2 算例 2: 对称的励磁涌流场景验证

当 A、B、C 三相合闸角分别为 0° 、 -120° 和 120° , 各相剩磁分别为 0.9 p.u.、 -0.9 p.u. 和 -0.9 p.u. 时合闸, 涌流 I_{CB} 是对称的, 如图 9 所示。尽管 I_{CB} 的二次谐波含量大于 15%, 但对于采用单相制动的保护, 其有可能发生保护误动的情况。而采用本文提出的方法, 有一相满足保护闭锁判据时, 即判定为励磁涌流, 闭锁三相差动保护。

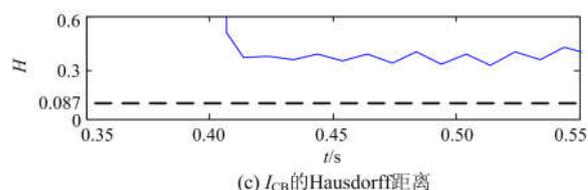
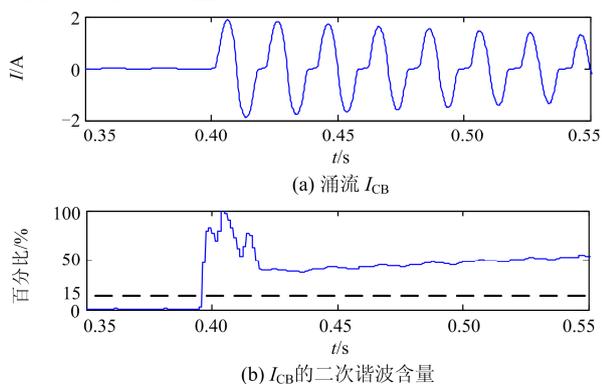


图 9 对称励磁涌流下的二次谐波含量和 Hausdorff 距离

Fig. 9 Symmetrical inrush, corresponding second harmonic ratio and Hausdorff distance

考虑到在发生对称性涌流场景时, 若间断角越小, 差流的对称性越好, 其与正弦波形的相似度越高, 根据差流计算所得 Hausdorff 距离则越小, 此时可能会存在部分无法判别的场景, 这也是波形相似度类算法固有的不足。

3.3 算例 3: 伴有异常数据的励磁涌流场景验证

三相开关在 $t=0.4$ s, 且 A 相剩磁为 0.9 p.u. 时合闸。异常数据在合闸后 3 ms 内出现, 采用时差法以及多种基于此的改进保护判据均会导致保护误动^[21]。如图 10 所示, 采用本文所提出的方法, 计算出的第一个部分 Hausdorff 距离为 0.107, 仍大于整定门槛 0.087, 如果没有异常数据, 则计算出的第一个部分 Hausdorff 距离为 0.105, 异常数据并不会影响到涌流的识别, 依然能够进行有效闭锁。

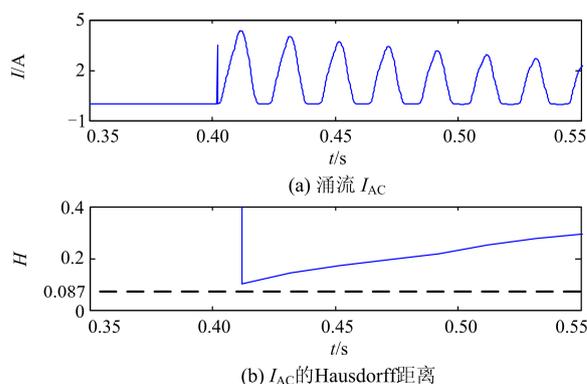


图 10 伴有异常数据的励磁涌流波形和相应的 Hausdorff 距离

Fig. 10 Inrush with false data and corresponding Hausdorff distance

3.4 算例 4: 严重的区内故障场景验证

设定在初始相位角为 0° 时发生三相金属性接地故障, 此时有最大非周期分量。如图 11 所示, 在故障发生后的半个周期(10 ms)时, 计算出第一个部分 Hausdorff 距离为 0.041 5, 低于涌流判别整定门槛 0.087, 保护开放动作。除时差法外, 其他方法的保护动作速度均慢于本文所提出的方法。

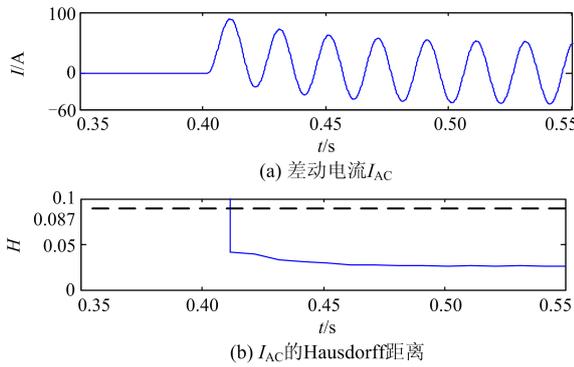


图 11 严重区内故障波形和相应的 Hausdorff 距离
Fig. 11 Serious internal fault and corresponding Hausdorff distance

3.5 算例 5: 轻微的区内故障场景验证

设定在初始相位角为 90° 时发生高阻抗单相接地故障, 过渡电阻 300Ω 。如图 12 所示, 保护判据在故障发生后 11 ms 内动作, 发送跳闸信号, 能有效切除故障, 保障系统稳定运行。

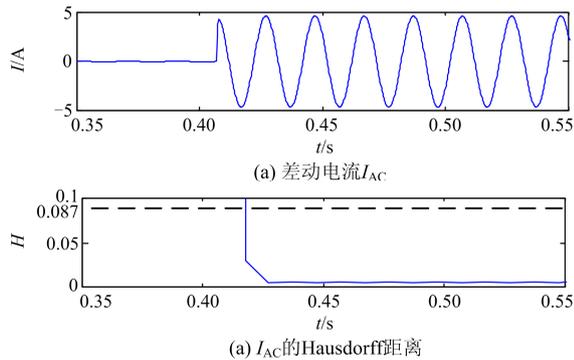


图 12 轻微区内故障波形和相应的 Hausdorff 距离
Fig. 12 Slight internal fault and corresponding Hausdorff distance

3.6 算例 6: 伴有异常数据的区内故障场景验证

设定在初始相位角为 0° 时发生三相金属性接地故障, 在故障后一个周期内出现异常数据, 如图 13 所示, 由于高含量二次谐波的存在, 交叉闭锁和其他基于波形对称原理的方法在保护动作跳闸前会有一定的延时闭锁。而利用本文所提出的方法, 其计算出第一个部分 Hausdorff 距离为 0.041 9, 小于整定门槛值, 保护不会误闭锁, 因此在故障发生后不久就能有效动作跳闸, 保证系统安全运行。

本文所提算法具备一定程度上的抗异常数据影响的能力(半个周波内有一个暂态干扰)。事实上, 对于较大干扰或者连续性的数据采样丢包等, 只要其波形转换后与标准波形有较大差异, 即可应用本文所提的部分 Hausdorff 距离计算 H 值, 计算结果自然较大, 在涌流场景下, 该值对于判断结果具有

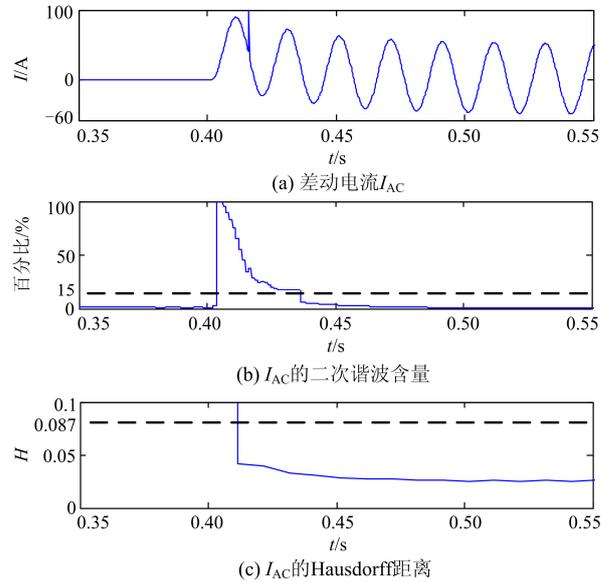


图 13 伴有异常数据的区内故障波形、二次谐波含量和相应的 Hausdorff 距离
Fig. 13 Internal fault with false data, corresponding second harmonic ratio and Hausdorff distance

助推作用, 并不影响其闭锁。而对于故障场景下的异常干扰, 较大的 H 值虽然不利于结果的判断, 但是能够通过调整门槛值进行规避。尽管常规的滤波滤序方法也能取得不错的抗异常数据干扰的能力, 但其大都需要较长的时间窗(如最小二乘法需要整周波的时间窗), 其速动性上略有不足, 这也恰恰是本文所提方法的优势所在——仅需半个时间窗便可判断。

4 结论

异常数据的出现, 会对变压器差动保护的励磁涌流识别造成影响, 可能导致差动保护误动。本文提出了一种基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流快速识别方法。该方法借助波形相似度的原理, 能够不受一定程度的异常数据影响, 准确区分出故障电流和励磁涌流, 同时由于只需借助半个工频周期内的数据, 该方法也能够在故障发生 10 ms 后快速跳闸动作。

参考文献

[1] IEC. (2005). Communication networks and systems in substations: IEC standard 61850[EB/OL]. <http://www.iec.ch>.
[2] CLAVEL F, SAVARY E, ANGAYS P, et al. Integration of a new standard: a network simulator of IEC 61850 architectures for electrical substations[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2015, 21(1): 41-48.

- [3] 常风然, 赵自刚, 周纪录, 等. 微机保护采样数据异常问题的分析与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(1): 77-79.
CHANG Fengran, ZHAO Zigang, ZHOU Jilu, et al. Analysis and countermeasures of problems about unusual sampling data in microprocessor-based protection[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(1): 77-79.
- [4] LE-LE L I, XIE Z Y, NA L I. Research on anti-interference for secondary equipments in substations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 2(1): 37-40.
- [5] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [6] 袁宇波, 陆于平, 李澄, 等. 三相涌流波形特征分析及差动保护中采用二次谐波相位制动的原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 23-28.
YUAN Yubo, LU Yuping, LI Cheng, et al. The characteristic analysis of three phase transformer inrush and the discussion of second harmonic restrained method using phase angle and amplitude[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 23-28.
- [7] 袁宇波, 陆于平, 李澄, 等. 基于附加相位判别的自适应二次谐波励磁涌流制动方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 19-24.
YUAN Yubo, LU Yuping, LI Cheng, et al. An adaptive second harmonic restrained method using phase angle and amplitude for inrush detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 19-24.
- [8] 黄少锋, 李珊珊, 肖远清. 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 9-15.
HUANG Shaofeng, LI Shanshan, XIAO Yuanqing. A novel identification criterion for transformer inrush current based on decay rate of aperiodic component[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 9-15.
- [9] 焦在滨, 行武, 王钊, 等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 146-151.
JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative-sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 146-151.
- [10] 冯存亮, 毕大强, 葛宝明. 基于时差法的牵引变压器和应涌流识别[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 66-72.
FENG Cunliang, BI Daqiang, GE Baoming. Sympathetic inrush identification for traction transformer based on time differential method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 66-72.
- [11] 曾湘, 林湘宁, 翁汉刚, 等. 基于相电压和差流时差特征的变压器保护新判据[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 79-83.
ZENG Xiang, LIN Xiangning, WENG Hanli, et al. Novel criterion of transformer protection based on time difference characteristic between phase voltage and differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 79-83.
- [12] 谷君, 郑涛, 肖仕武, 等. 基于时差法的Y/△接线变压器和应涌流鉴别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 6-11.
GU Jun, ZHENG Tao, XIAO Shiwu, et al. A new algorithm based on time differential method to identify sympathetic inrush of transformers connected in Wye-delta mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 6-11.
- [13] 谭明, 罗建, 余高旺, 等. 基于故障分量的牵引变压器和应涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 87-92.
TAN Ming, LUO Jian, YU Gaowang, et al. An algorithm based on the fault component to identify traction transformer sympathetic inrush[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 87-92.
- [14] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.
SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.
- [15] 张炳达, 黄杰. 基于差分双正交小波熵的变压器励磁涌流识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 9-13.
ZHANG Bingda, HUANG Jie. Identification of transformer inrush current based on difference

- biorthogonal wavelet entropy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 9-13.
- [16] 徐岩, 马静, 王增平. 利用数学形态学提取暂态量的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 98-105.
XU Yan, MA Jing, WANG Zengping. Power transformer protection based on transient data using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 98-105.
- [17] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 98-105.
HUANG Jiadong, LUO Weiqiang. New algorithm to identify inrush current based on improved mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 98-105.
- [18] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.
YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.
- [19] SUN Z, CHEN Y. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing in-rush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 42-46.
- [20] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [21] LIN X, WENG H, LIU P, et al. Analysis of a sort of unusual mal-operation of transformer differential protection due to removal of external fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1374-1379.
-
- 收稿日期: 2018-01-10; 修回日期: 2018-05-10
作者简介:
郭倩雯(1989—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: guoqw@guangzhou.csg.cn
(编辑 姜新丽)