

基于波形相似度的抗电流互感器饱和和变压器相位差动保护

翁汉琨¹, 王 胜¹, 林湘宁², 陈 乐², 黄景光¹, 李振兴¹

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北省宜昌市 443002;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074)

摘要: 变压器差动保护中电流互感器饱和导致保护可靠性与速动性降低。文中利用波形相似度对变压器区内、区外故障, 尤其是电流互感器饱和时两侧电流相位信息进行提取, 提出一种基于波形相似度的抗电流互感器饱和和变压器差动保护判据, 以识别包含电流互感器饱和在内的各种故障情况。仿真与动模试验结果表明, 该判据在识别变压器区内、外故障, 尤其是电流互感器饱和时均能做出正确判断。对于噪声干扰的情况仅需做简单处理判据即可有效识别故障。

关键词: 变压器保护; 相位差动保护; 抗电流互感器饱和; 波形相似度; Hausdorff 距离算法

0 引言

长期以来, 差动保护被广泛应用于变压器主保护。对于励磁涌流对变压器差动保护影响的分析, 前人已做了许多研究^[1-4]。此外, 由于变压器差动保护往往是基于差流幅值对故障进行识别, 当电流互感器(TA)发生饱和时会导致其二次电流波形发生畸变, 可能引发差流幅值的改变, 造成差动保护错误动作。针对这一问题, 国内外学者也提出了一些解决方法, 如谐波判别法^[5]、磁制动原理^[6]、时差法^[7-8]、虚拟制动电流法^[9-10]、采样值差动辨别 TA 饱和^[11-12]、利用数学形态学识别法^[13-14]、利用动态虚拟磁通识别法^[15]等, 这些算法在识别 TA 饱和及提高差动保护动作性能方面取得了不错的效果。但是, 谐波判别法对于变压器区内故障存在大量谐波分量的情况, 存在误判导致延时动作的可能; 磁制动原理、利用动态虚拟磁通识别 TA 饱和和较难确定电流互感器的初始磁通, 且会受电流互感器剩磁的影响; 时差法对时间的精确测量有较高的要求, 且较难确定区外故障后解除闭锁的时机; 虚拟制动电流法需要与其他 TA 饱和识别判据结合使用; 利用数学形态学算法较复杂, 计算量大, 牺牲判别时间。同时, 上述算法在滤除噪声干扰时需配置较复杂的滤波环节, 抗干扰性需进一步提高。

通过对变压器区内、外故障及故障伴随 TA 饱和时两侧电流的波形及相位特征进行分析发现, 两

侧电流相位特征不会因 TA 饱和发生变化, 可通过简单算法对相位进行提取, 用于对变压器区内外故障, 尤其是伴随 TA 饱和故障进行判别。

本文首先通过对区内、区外故障及故障伴随 TA 饱和时波形相似度进行分析, 比较并利用其相似程度的差异, 提出采用新型的波形相似度算法对变压器两侧 TA 二次电流相位特征差异进行提取, 构成基于波形相似度的抗 TA 饱和和变压器相位差动保护判据。通过仿真与动模试验, 对变压器区内、区外故障及故障伴随 TA 饱和等各类扰动情况判据的有效性进行验证。

1 电流波形相似度及保护判据原理

1.1 变压器两侧电流波形相似度

以电力系统中双侧电源双绕组变压器模型为例, 设两侧电流 A 相的采样值序列为 i_1 和 i_2 进行分析, 取变压器两侧电流流入变压器方向为正方向。理想运行情况下变压器两侧电源同相位。以 4 kHz 的采样频率, 分别采集一个周期内区内、外故障及 TA 饱和时变压器两侧电流, 数值标幺化后的比较图见附录 A 图 A1, 图中实线表示 i_1 , 虚线表示 i_2 。

由图 A1 可知, 理想情况下, 当变压器发生区内故障时, i_1 与 i_2 同相位, 区外故障时, i_1 与 i_2 相位相差 180°; 而对于 TA 饱和的情况, 虽然波形发生了畸变, 但并不影响两电流序列的整体相位关系。

在两侧电流序列的相位信息提取算法上, 本文考虑使用原理简单, 计算量小且抗干扰性强的波形相似度算法。这样, 当两侧电流序列同相位, 即区内故障时, 两波形相似度较高, 而当两侧电流序列相位

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-09-19。

上网日期: 2019-01-10。

国家自然科学基金资助项目(51607106)。

相差接近 180° ,即区外故障时,两波形相似度极低。此外,由于 TA 饱和时,两侧电流序列的整体相位信息并未发生变化,故其波形相似度结果也不会受到明显影响。

对于波形相似度的识别最常用的两种度量函数为距离度量与相似度度量。余弦相似度作为最常用的相似度度量,其本质是从方向上区分数据的差异,但对于有干扰的数据而言,其容易导致波形的相似度判据发生误判^[16];而距离度量中最远距离、最近距离、质心距离则未考虑空间目标的形状与位置差异^[17]。Hausdorff 距离则是一种基于空间目标整体形状特征对两点集间相似程度进行度量且具有较好抗干扰能力的距离度量函数。

1.2 Hausdorff 距离算法原理

对于两个有限点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$,则 A 与 B 间的 Hausdorff 距离定义为:

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

其中:

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

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

式中: $\|\cdot\|$ 表示两点之间的 Euclidean 距离。将点集 A 中的某个点 a_i 到点集 B 中所有点的距离按大小顺序排列,其中最小者记为 d_i ,则称 d_i 为对应 a_i 的最小距离。首先分别求得点集 A 中的所有点 $a_i (i=1, 2, \dots, m)$ 对应的最小距离 $d_i (i=1, 2, \dots, m)$,其组成的集合记为 D ,再将 D 中元素按大小顺序进行排列,其中最大者即为 $h(A, B)$,称作点集 A 到 B 的单向 Hausdorff 距离;同理可求得点集 B 到 A 的单向 Hausdorff 距离 $h(B, A)$ 。 $H(A, B)$ 则为两者中的较大者,以此对波形相似度进行判别。

1.3 基于 Hausdorff 算法的保护判据

由上文分析可知, Hausdorff 距离算法是利用两波形的特征点集进行相似度识别,在电力系统继电保护中,传感器采集到的电流序列与时间组成二维点集,而点集中的每一个点均可作为该算法的一个特征点,因此,该算法对继电保护有较强的适应性^[16, 18-19]。

下文以双侧电源电力系统中双绕组变压器模型为例,分析基于波形相似度的抗 TA 饱和和变压器相位差动保护判据。

1.3.1 电流标么化处理

记变压器两侧电流 A 相的采样值序列分别为 i_1 和 i_2 ,以时间为横坐标,电流量为纵坐标生成二维点集。理论上求取 $H(i_1, i_2)$ 即可计算出两波形

的相似度,但由于该算法主要是对相位信息进行提取,幅值的大小会影响 Hausdorff 距离值的大小,为方便整定计算,首先应消除波形幅值的影响。具体方式是对波形进行标么化处理:在确定的时间窗内提取电流序列最大值与最小值分别记为 i_{\max} 与 i_{\min} ,并以此为基础,对序列中各点进行幅值压缩,使电流序列各点落在 $[0, 1]$ 的变化范围内,从而得到标么化的电流序列。其压缩方式为:

$$i^*(k) = \frac{i(k) - i_{\min}}{i_{\max} - i_{\min}} \quad (4)$$

式中: $k \in \{1, 2, \dots, n\}$, n 为时间窗内电流序列点的个数。

同时对变压器两侧 TA 二次电流序列进行标么化处理得到 i_1^* 与 i_2^* ,计算两个序列间不匹配度所对应的 Hausdorff 距离值 $H(i_1^*, i_2^*)$,记为 H ,则 H 值必然落在 $[0, 1]$ 之间。

1.3.2 数据窗与采样频率的选取

数据窗长度的选取关系到判据的可靠性。对 Hausdorff 距离算法而言,由于其只涉及点集之间两个特征点的距离计算,因此使得该算法可在宽泛的数据窗长度范围内进行选取。考虑到 TA 饱和时可能造成波形在局部区域发生畸变,如若数据窗选取过小,则会使得其在仅覆盖畸变区域时导致数据窗内电流幅值发生较大变化,可能导致两波形局部的差异被异常放大,导致判据误动。据此,本文选取工频周期 20 ms 作为数据窗的长度。

该数据窗长度并不会给保护判据带来附加的延时。因为当该保护判据启动时,数据窗内已包含故障点数据,仅需向前追溯部分数据点,直至补齐数据窗,再通过计算 Hausdorff 距离值即可进行判断。

另外,采样频率的不同,理论上并不会造成波形整体特征的不同,因此对 H 值计算结果影响较小。考虑工程实际,本文在 4 kHz 的采样频率下,分别对 i_1 与 i_2 进行标么化处理,得到两组特征点 $i_1^*(k)$ 与 $i_2^*(k)$,利用两组特征点进行 Hausdorff 距离计算并通过时间窗的推移即可得到一组 $H(i_1^*, i_2^*)$ 序列,通过设置合适的阈值即可对故障进行识别。

在 4 kHz 的采样频率下,每个数据窗仅有 80 个采样点,完成一次 Hausdorff 距离计算所需要的时间极短。因此,理想情况下,在发生区内故障时,一旦判据启动,保护即会瞬时动作。因此,可满足保护速动性的要求。

1.3.3 判据整定计算

由附录 A 图 A1 可知,理论上,在发生区内故障时,两侧标么化电流序列基本完全重合,依此计算出的 H 值近似为 0,若此时一侧 TA 发生饱和,由于

一侧电流序列发生了畸变,使得两序列的最大不相似度增大,即 H 值会相应增大;而对于区外故障时,由于两侧电流基本完全反相,相似度极低,此时 H 值基本为 1,如若此时一侧 TA 发生饱和,虽然波形会发生畸变,但其最大不相似度变化较小,故 H 值依旧接近于 1。

据此,根据 H 值的大小即可对变压器区内与区外故障进行区分。为考虑 TA 饱和的影响,当区内 TA 饱和较严重时, H 值接近 0.5,故以此作为保护整定值。当满足式(5)时,保护动作。

$$H < H_{\text{set}} \quad (5)$$

式中: H_{set} 取 0.5。

1.3.4 判据流程

对变压器两侧 TA 二次电流 i_1 与 i_2 进行提取,判据在某一侧电流越限后启动,对两个电流序列同时进行追溯找到一个工频周期数据窗内的电流序列最大值与最小值 $i_{1\max}, i_{2\max}$ 与 $i_{1\min}, i_{2\min}$,基于此生成 i_1 和 i_2 标么化序列(i_1^* 与 i_2^*),计算两者 H 值。且随着数据窗的推移,新数据的进入,标么化实时进行, H 值同步进行更新,形成 H 值序列,根据 H 值大小进行故障判别。

据此可构建基于波形相似度的抗 TA 饱和变压器保护判据,流程如图 1 所示。

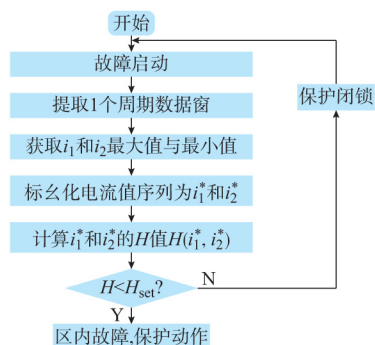


图 1 保护判据流程图

Fig.1 Flow chart of the protection criterion

1.3.5 三绕组变压器及单侧电源保护判断逻辑

当判据用于三绕组变压器时需将变压器三侧 TA 测得的电流进行转化,形成判据所需的两个测量电流。

由于三绕组变压器差动保护原理与双绕组变压器差动保护类似,折算至同一电压等级的电流均遵循基尔霍夫电流定律。取流入变压器的电流为正,则三侧电流分别为 i_1, i_2 和 i_3 ,记变压器折算至高压侧的三侧电流序列分别为 i_1', i_2' 和 i_3' ,将三侧电流两两相加得到 $i_1' + i_2', i_2' + i_3'$ 与 $i_1' + i_3'$,再分别与另一侧电流(i_3', i_1', i_2')进行相似度识别,得到

三组 H 值序列 $H((i_1' + i_2')^*, (i_3')^*), H((i_2' + i_3')^*, (i_1')^*), H((i_1' + i_3')^*, (i_2')^*)$,分别记为 H_{12_3}, H_{23_1} 及 H_{13_2} 。正常运行或外部故障时,折算至同一电压等级后的三侧电流向量和应为 0,故 $i_1' + i_2'$ 与 $i_3', i_2' + i_3'$ 与 $i_1', i_1' + i_3'$ 与 i_2' 波形均应完全反相,即 H_{12_3}, H_{23_1} 及 H_{13_2} 值均接近于 1;而在区内故障时,故障侧电流应与其他两侧电流之和同相,此时 H 值应接近于 0,使得三组 H 值中至少有一组低于 0.5 的门槛值,故在得到三组 H 值中若存在一组 H 值低于 0.5,则认为变压器发生区内故障,保护动作。令 H 值大小对应的逻辑值为 P , H 值低于 0.5 时取 $P=1$, H 值高于 0.5 时取 $P=0$,则三绕组变压器保护动作的判据即为 $P_{12_3} \oplus P_{23_1} \oplus P_{13_2} = 1$ 。据此即可完成与双绕组变压器类似的差动保护。

当变压器在单侧电源供电情况下运行时,变压器两侧依旧会装设 TA,在正常运行或外部发生故障时,与双侧电源供电相似,取电流流入变压器方向为正方向,此时变压器两侧 TA 测得的电流即可作为 i_1 与 i_2 ,经过标么化处理后即可求得 $H(i_1^*, i_2^*)$;而当变压器发生区内故障时,由于负荷侧无电源供应,使得负荷侧 TA 测得的电流基本为 0,而电源侧电流越限,此时认为两侧电流无相似性可言,故直接赋 H 值为 0。

2 仿真与动模试验验证

2.1 仿真验证

2.1.1 双绕组变压器仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建如附录 B 图 B1 所示仿真模型,对包含变压器双侧电源变压器两侧区内、区外故障及伴随 TA 饱和,电源存在不同相角差以及单电源供电等多种情况进行仿真验证,部分仿真结果见附录 B。

2.1.2 三绕组变压器仿真验证

搭建三绕组变压器仿真模型(参见附录 C 图 C1),对三绕组变压器区内区外故障进行仿真,部分仿真结果见附录 C。

通过附录 B 和附录 C 的仿真结果可知,本文所提判据在双绕组变压器运行情况下能有效识别区内、区外故障且不受 TA 饱和的影响,对于三绕组变压器亦可对正常的区内、区外故障进行识别,且识别时间较短。

2.1.3 抗噪声性能分析

根据前文 Hausdorff 距离算法的定义和计算公式可知,该算法主要反映两组序列之间的整体不匹配度,参与算法的两组序列点集并不完全要求数量

齐整一一对应,且少量点不参与计算,也不会影响两组序列点集的不匹配度计算结果。利用该特征,本文采用简单的方法使保护判据具备较强抗噪声性能,即:在一个数据窗的电流序列中,进行判据计算前,找出极值点,该点不参与 H 值计算。如果该极值点是噪声点,则在 H 值计算时已将其滤掉;若该极值点不是噪声点,而是电流序列峰值,对其舍弃也不会对两侧电流相位特征差异产生可观的影响。由此,可增强该算法的抗噪声干扰能力。

将仿真算例中双绕组变压器一次侧发生A相接地故障时变压器两侧电流波形中随机添加噪声干扰,附录D图D1给出了0.3~0.6 s内噪声干扰下的两侧电流波形序列、判据原始算法 H 值序列以及每个数据窗舍弃2个极值点不参与计算的改进算法 H 值序列。由图可知,当存在噪声干扰时,会对判据原始算法的 H 值计算造成一定的影响,可能会使得判据短暂闭锁保护使其延时动作,使得速动性受到影响。但采用每个数据窗不考虑两个极值点参与计算后,改进算法计算得到的 H 值又能在故障后1/4周期内低于门槛值,即保护迅速准确动作,从而保障了保护的速动性。这体现了经过简单改进后的判据在抗噪声方面的优越性。

2.2 动模验证

建立如图2所示动态模拟试验系统模型,进一步验证判据有效性。试验系统频率为50 Hz,以4 kHz的采样频率(每周周期80点)记录干扰前后A相电流共计500个采样点数据。分别对 F_1 、 F_2 、 F_3 处发生故障各组案例进行测试。

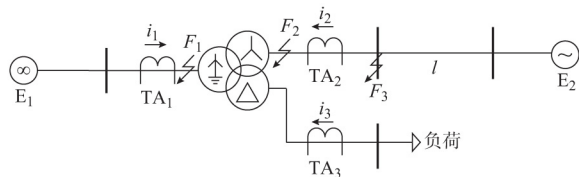


图2 动态模拟试验系统模型
Fig.2 System model of dynamic analog experiment

电源 E_1 和 E_2 以及变压器容量分别为100,15,5 kVA;变压器由3个单相变压器按 $Y_0/Y/\Delta$ 方式连接,变比为462 V/462 V/380 V;线路 l 等效阻抗 $Z=2.36\angle 81.9^\circ \Omega$,等效长度为30 km;电流互感器 TA_1 、 TA_2 、 TA_3 变比分别为20/5,20/5,100/5。

试验案例共12组,包括:①双绕组变压器区内 F_1 处A相接地故障、 F_1 处三相接地故障伴随一侧TA饱和、 F_2 处A相接地故障、 F_2 处三相接地故障,区外 F_3 处A相接地故障、 F_3 处三相接地故障

伴随一侧TA饱和;②三绕组变压器区内 F_1 处A相接地故障、 F_1 处AB相间短路故障、 F_2 处A相接地故障、 F_2 处三相接地故障,区外 F_3 处A相接地故障、 F_3 处三相接地故障。

其中,在进行双绕组变压器试验时,将三绕组变压器三角形侧空载,作为双绕组变压器运行进行试验。

限于篇幅,下面给出2例双绕组和1例三绕组变压器试验记录电流波形和所提判据验证结果。所有12组试验案例判据动作情况见附录E表E1。

2.2.1 双绕组变压器动模试验验证

将三绕组变压器三角形侧空载,作为双绕组变压器运行进行试验。试验结果见图3和图4。图中为A相电流波形,电流为标么值,蓝色实线表示变压器一次侧电流序列 i_1 ,黑色虚线表示变压器二次侧电流序列 i_2 。

试验案例1:双绕组变压器区内 F_2 处在第200个采样点时发生A相接地故障(区内故障)。

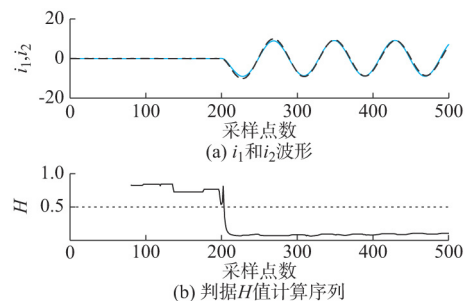


图3 两侧电流波形及 H 值计算结果(案例1)
Fig.3 Current waveforms and value of H (case 1)

由图3可知,计算的 H 值序列在大约205个点(扰动后5个采样点)时已低于0.5的门槛值,保护快速可靠动作。

试验案例2:双绕组变压器区外 F_3 处在第195个采样点时发生三相接地故障,且一次侧TA发生饱和(区外故障伴随TA饱和)。

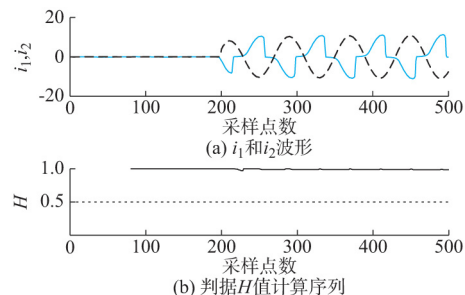


图4 两侧电流波形及 H 值计算结果(案例2)
Fig.4 Current waveforms and value of H (case 2)

由案例2的试验结果可知,对于双绕组变压器

而言,当 F_3 处发生故障且伴随 TA 饱和时, H 值稳定高于 0.5 的动作门槛值,保护能有效闭锁。

此外,对于变压器外部故障切除后 TA 饱和导致变压器差动保护误动也是当前存在的一大问题^[20-21]。而本文所提判据由于仅使用两侧电流信息,即使外部故障切除后因 TA 饱和而存在幅值可观的虚假差流,但由于随着外部故障切除,变压器两侧电流已恢复至正常运行值,其幅值均不会越限,此时判据将不启动,从而可有效避免此类误动风险。

2.2.2 三绕组变压器动模试验验证

试验案例 3: 三绕组变压器区内 F_2 处在第 195 个采样点时发生三相接地故障(区内故障)。

试验结果如图 5 所示。

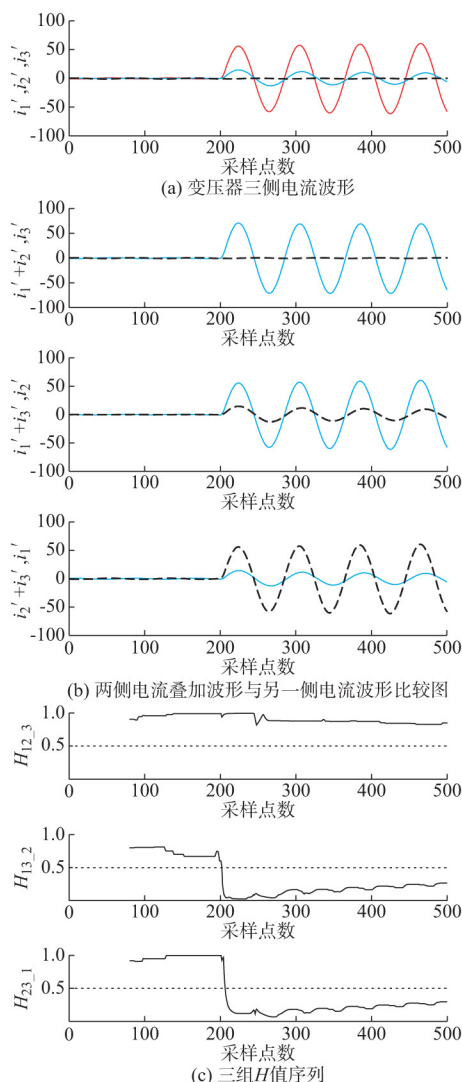


图 5 电流波形及 H 值计算结果(案例 3)
Fig.5 Current waveforms and value of H (case 3)

图 5(a)为变压器三侧电流波形,其中红色实线为 i_1' ,蓝色实线为 i_2' ,黑色虚线为 i_3' ;图 5(b)为两

侧电流叠加波形与另一侧电流波形比较图,其中蓝色实线为两侧电流的叠加波形,黑色虚线为另一侧电流波形;图 5(c)为三组 H 值序列。

由试验结果可知,尽管 $H_{12,3}$ 的值稳定高于 0.5 的门槛值,但 $H_{13,2}$ 及 $H_{23,1}$ 均在大约 205 个点(扰动后第 10 个采样点)时已低于 0.5 的门槛值,此时 $P_{12,3} = 0, P_{13,2} = 1, P_{23,1} = 1$,即 $P_{12,3} \oplus P_{23,1} \oplus P_{13,2} = 1$ 保护快速可靠动作。

由动模试验结果可知,对于 F_1 和 F_2 处发生区内故障的情况,本文所提判据均能在 $1/4$ 周期内做出正确识别,使保护迅速动作;对于 F_3 处发生的区外故障,则能可靠闭锁保护。

3 结语

本文利用波形相似度 Hausdorff 距离算法对电流相位信息差异进行提取,提出了一种抗 TA 饱和的变压器相位差动保护判据。仿真与动模试验结果表明,所提判据能快速准确地区分正常运行变压器的区内与区外故障,其识别能力不受 TA 饱和影响。此外,由于判据不采用传统变压器差动保护差流信息,因此能有效防止因外部故障切除后 TA 饱和产生虚假差流而造成差动保护的误动。对于变压器涌流识别与本文判据之间的逻辑关系需要进一步研究。应用于实际系统之前,还需要收集现场实测数据对判据进行验证并进一步进行完善和优化。

感谢“湖北省梯级水电站运行与控制重点实验室(三峡大学)开放基金资助项目(2018KJX05)”对本文工作的资助!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 陈天恩. 变压器差动保护及励磁涌流识别研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
CHEN Tianen. Study on differential protection of transformer and inrush current identification [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [2] 翁汉刚, 李雪华, 鲁俊生, 等. 特高压换流变压器对称性涌流的生成及其对大差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 153-158. DOI: 10.7500/AEPS2016042000.
WENG Hanli, LI Xuehua, LU Junsheng, et al. Symmetrical inrush current mechanism of ultra-high voltage converter transformer and its impact on converter connection-transformer differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 153-158. DOI: 10.7500/AEPS2016042000.

- [3] 曾杰,张禄亮,吴青华.基于形态学骨架的变压器差动保护[J].电力系统自动化,2017,41(23):68-76. DOI: 10.7500/AEPS20170111008.
- ZENG Jie, ZHANG Luliang, WU Qinghua. Morphological skeleton based differential protection for power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 68-76. DOI: 10.7500/AEPS20170111008.
- [4] 丛伟,王伟旭,肖静,等.控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案[J].电力系统自动化,2017,41(8):159-165. DOI: 10.7500/AEPS20161014001.
- CONG Wei, WANG Weixu, XIAO Jing, et al. Transformer inrush current restraining scheme based on switching voltage amplitude controlling method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 159-165. DOI: 10.7500/AEPS20161014001.
- [5] 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. A algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(5): 19-24.
- [6] 黄志元,何奔腾,张雪松.利用磁制动检测电流互感器饱和的实用化研究[J].电力系统自动化,2006,30(4):75-79.
- HUANG Zhiyuan, HE Benteng, ZHANG Xuesong. Research on the practicality of current transformer saturation detection using the magnetic restraint principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 75-79.
- [7] 李岩,陈德树,张哲,等.鉴别TA饱和的改进时差法研究[J].继电器,2001,29(11):1-4.
- LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA's saturation[J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4.
- [8] 沈全荣,严伟,梁乾兵,等.异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用[J].电力系统自动化,2005,29(16):84-86.
- SHEN Quanrong, YAN Wei, LIANG Qianbing, et al. Asynchronous method for the recognition of current transformer saturation and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 84-86.
- [9] 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.
- [10] 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 Huihong, XIE Baihuang, BI Daqiang, et al. Using the sampling differential protection based on the constructed restraint current to identify CT saturation[J]. Relay, 2006, 34(13): 50-53.
- [11] 杨经超,尹项根,陈德树,等.采样值差动保护动作特性的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(9):71-77.
- YANG Jingchao, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Study on the operating characteristic of sampled value differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 71-77.
- [12] SACHDEV M S, SIDHU T S, GILL H S, et al. A busbar protection technique and its performance during CT saturation and CT ratio-mismatch [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 895-901.
- [13] 陈国锋.基于数学形态学的变压器差动保护的研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- CHEN Guofeng. Research on transformer differential protection based on mathematical morphology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [14] 林湘宁,刘沛,高艳.基于数学形态学的电流互感器饱和和识别判据[J].中国电机工程学报,2005,25(5):46-50.
- LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 46-50.
- [15] 董新涛,康小宁,步梦琼,等.基于动态虚拟磁通分析的CT饱和识别方案研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):126-130.
- DONG Xintao, KANG Xiaoning, BU Mengqiong, et al. Research on the method to identify CT saturation based on dynamic virtual magnetic flux[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 126-130.
- [16] 赵航,林湘宁,喻锐,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.
- [17] 曹京京.Hausdorff距离的计算原理及其在二维匹配中的应用[D].大连:大连理工大学,2013.
- CAO Jingjing. The calculation theory of Hausdorff distance and its application to the matching of 2D geometrical objects[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [18] 翁汉琰,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.
- [19] 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. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027.
- [20] 谷君,郑涛,黄少锋,等.变压器外部故障切除后差动保护误动原因及防止对策[J].中国电机工程学报,2009,29(16):49-55.
- GU Jun, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. Mal-operation of transformer differential protection after removal of

external fault and countermeasure [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 49-55.

[21] 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 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.

电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: honey_weng@163.com

王 胜(1996—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: 745232821@qq.com

林湘宁(1970—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统安全分析、继电保护与控制。E-mail: xiangning.lin@hust.edu.cn

(编辑 代长振)

翁汉珪(1980—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:

Waveform Similarity Based Transformer Phase Differential Protection Against Current Transformer Saturation

WENG Hanli¹, WANG Sheng¹, LIN Xiangning², CHEN Le², HUANG Jingguang¹, LI Zhenxing¹

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station

(China Three Gorges University), Yichang 443002, China ;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract : The saturation of current transformer results in the decrease of reliability and rapidity of transformer differential protection. The waveform similarity is used to extract the phase information of the current on both sides of the transformer , especially when the current transformer is saturated. A transformer differential protection criterion against current transformer saturation based on waveform similarity is proposed to identify various faults including saturation of current transformer. The results of simulation and dynamic simulation tests show that the criterion can make correct judgments when identifying faults inside and outside the transformer, especially when the current transformer is saturated. In the case of noise interference, the fault can be identified effectively only by simple processing.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106).

Key words : transformer protection ; phase differential protection; against current transformer saturation; waveform similarity; Hausdorff distance algorithm

(上接第 100 页 continued from page 100)

Optimal Power Flow for AC/DC System Based on Cooperative Multi-objective Particle Swarm Optimization

LI Yahui, LI Yang, LI Guoqing

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract : In order to uniformly coordinate economy and voltage deviations, a novel multi-objective optimal power flow (MOPF) algorithm is proposed for an AC/DC system with VSC-HVDC based on cooperative multi-objective particle swarm optimization (CMOPSO). In order to minimize power generation costs and voltage deviations, the MOPF model of the AC/DC system is built based on the VSC-HVDC steady-state model. The CMOPSO is adopted for solving the MOPF model to find well-distributed Pareto-optimal solutions. Then the solutions are divided into different groups via the fuzzy C-means algorithm. Finally, the optimal compromise solutions reflecting decision-makers' different preferences are identified from each group by comparing the priority memberships which are calculated by using the grey relation projection method. The validity of the proposed approach is verified by using the modified IEEE 14-bus and 118-bus systems.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902401) and National Natural Science Foundation of China (No. 51677023).

Key words : AC/DC system; multi-objective optimal power flow; voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); cooperative multi-objective particle swarm optimization; multiple attribute decision-making

附录 A 标么化电流波形比较

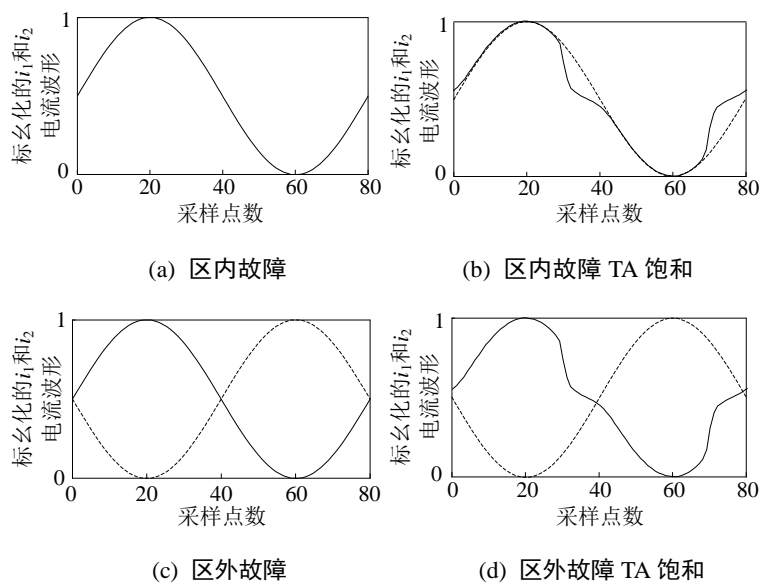


图 A1 标么化电流波形比较

Fig.A1 Comparison of normalized current waveform

附录 B 双绕组变压器仿真模型及结果分析

B.1 双绕组变压器仿真模型

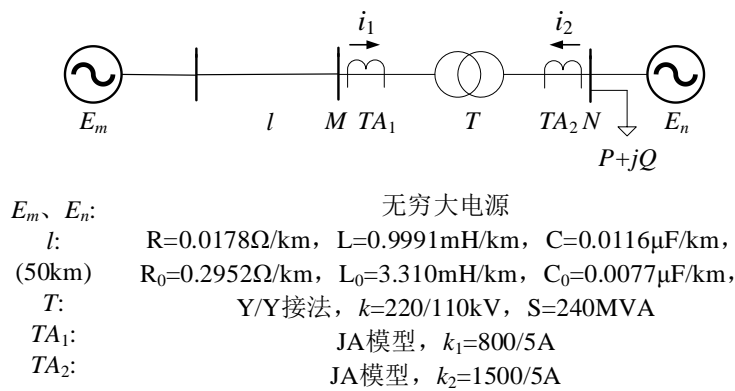


图 B1 双侧电源双绕组变压器模型

Fig.B1 Double winding transformer model

B.2 双绕组变压器仿真结果

仿真结果波形均以 A 相为例，电流波形采用标么值，蓝色实线表示变压器一次侧电流序列 i_1 ，黑色虚线表示变压器二次侧电流序列 i_2 。

算例 1：变压器绕组内部轻微匝间故障场景。 $t=0.4\text{s}$ 时变压器内部 A 相发生 10%匝间故障。

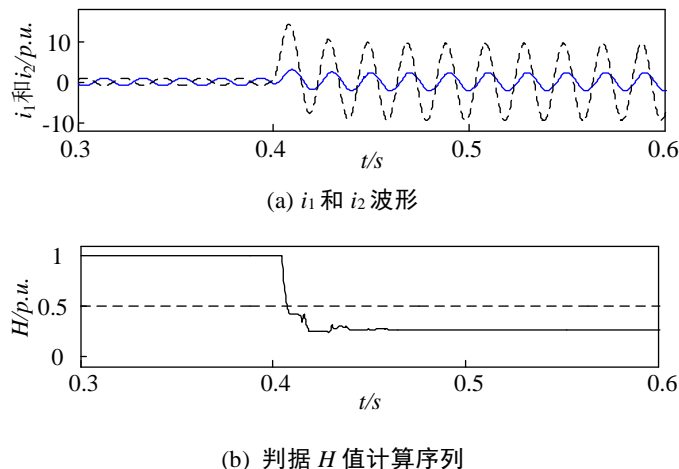


图 B2 两侧电流波形及 H 值计算结果（算例 1）

Fig.B2 Current waveforms and value of H for the proposed criterion(case 1)

如图 B2 所示，图(a)表示 0.3~0.6s 期间变压器两侧 TA 二次电流序列；图(b)为根据图(a)电流序列采用本文所提判据算法计算出的 H 值序列。由图可知，当判据启动后，保护在 $t=0.406\text{s}$ 即可可靠动作，即在故障后 1/2 周期内已能可靠判别，保护速动性可得到保障。

算例 2：变压器区内故障 TA 饱和场景。 $t=0.4\text{s}$ 时变压器一次侧出口发生 A 相接地故障，且一次侧 TA 发生饱和。

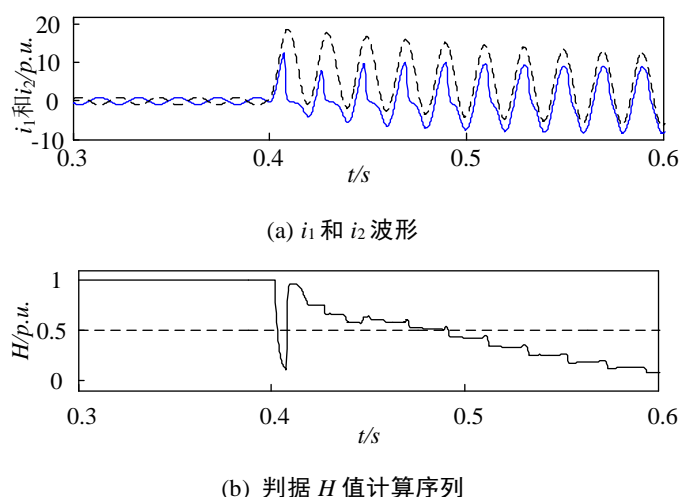


图 B3 两侧电流波形及 H 值计算结果（算例 2）

Fig.B3 Current waveforms and value of H for the proposed criterion(Scenario 2)

由图 B3 可知，变压器发生区内故障，且一次侧 TA 发生饱和的情况下，在 $t=0.403\text{s}$ 时，判据计算 H 值即低于 0.5 的动作门槛值，保护迅速动作，即使后续因 TA 饱和而使变压器一次侧电流波形发生畸变， H 值有所上升，但判据已在故障发生初期进行了正确判别，使保护迅速正确动作。这是因为即使发生再严重的 TA 饱和，TA 饱和的开始总是滞后故障发生时刻一个时间段的，通常认为是 3~5ms，而在此期间内，变压器两侧电流相位及波形信息都是能正确反映故障状态的，因此利用该判据可正确识别故

障发生初始阶段的两侧电流的相位信息并做出正确的故障判别。对于该情况下，传统差动保护采用的差流及其二次谐波百分比仿真分析结果如图 B3 所示，可以看到在 $t=0.472\text{s}$ 以前，差流二次谐波百分比都高于 15% 的制动门槛值，此时保护会误制动直至 0.472s 才能开放动作，造成保护动作长时间延时；而采用本文所提判据，保护则会在故障后 1/4 周波内迅速正确动作。

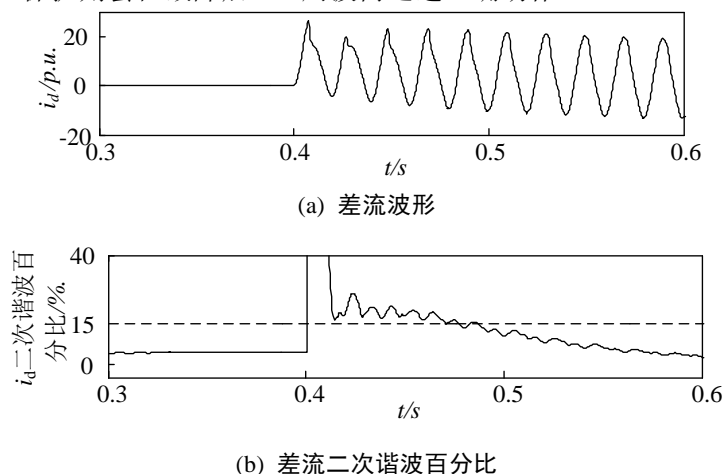


图 B4 差流波形及二次谐波百分比（算例 2）

Fig.B4 Differential current and the ratio of second harmonic to fundamental(Scenario 2)

算例 3：单侧电源供电系统变压器正常区内故障场景。电源 E_n 退出运行， $t=0.4\text{s}$ 时变压器一次侧出口发生 A 相接地故障。

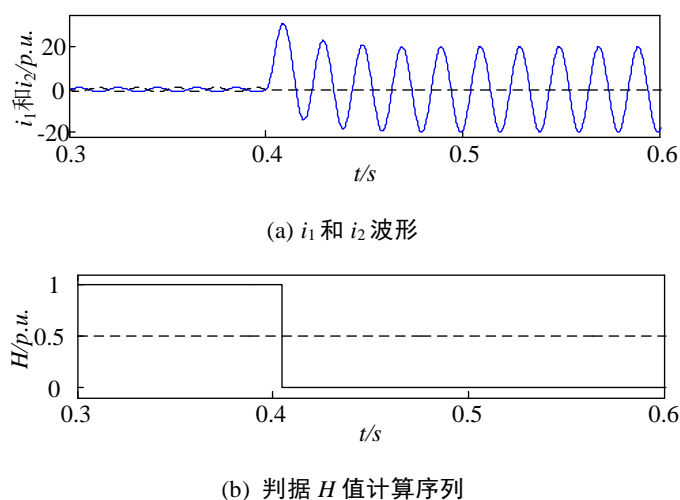
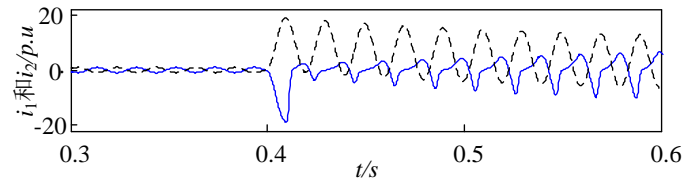


图 B5 两侧电流波形及 H 值计算结果（算例 3）

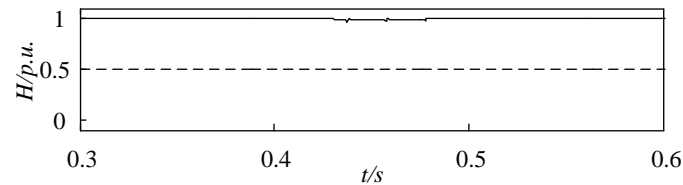
Fig.B5 Current waveforms and value of H for the proposed criterion(Scenario 3)

由图 B5 可知，对于单侧电源供电系统而言，当发生区内故障时，一次侧电流超限，二次侧电流基本为 0，此时赋 H 值为 0，保护依旧可以准确动作。

算例 4：变压器区外故障 TA 饱和场景， $t=0.4\text{s}$ 时，变压器一次侧外部发生 A 相接地故障，一次侧 TA 发生饱和。



(a) i_1 和 i_2 波形



(b) 判据 H 值计算序列

图 B6 两侧电流波形及 H 值计算结果 (算例 4)

Fig.B6 Current waveforms and value of H for the proposed criterion(Scenario 4)

由图 B6 的仿真结果可知,对于变压器区外故障伴随一侧 TA 饱和时,其二次电流的相位特征未受饱和影响, H 值稳定的大于 0.5 的动作门槛值,此时保护能准确制动。

附录 C 三绕组变压器仿真模型及结果

C.1 三绕组变压器仿真模型

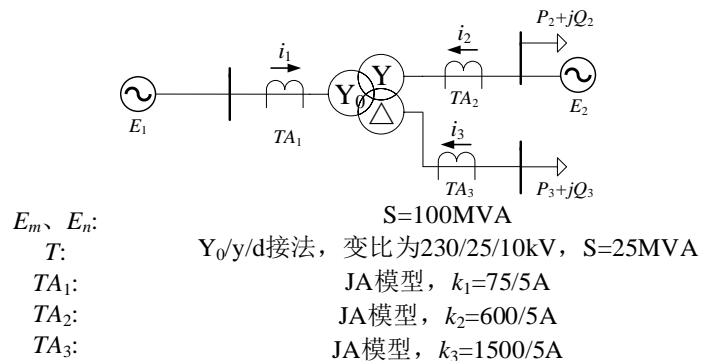
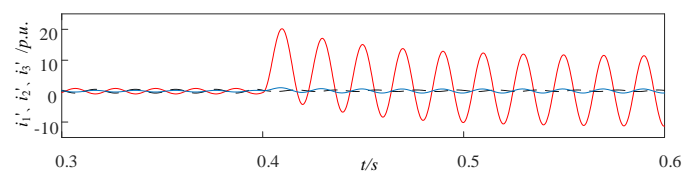


图 C1 三绕组变压器仿真模型

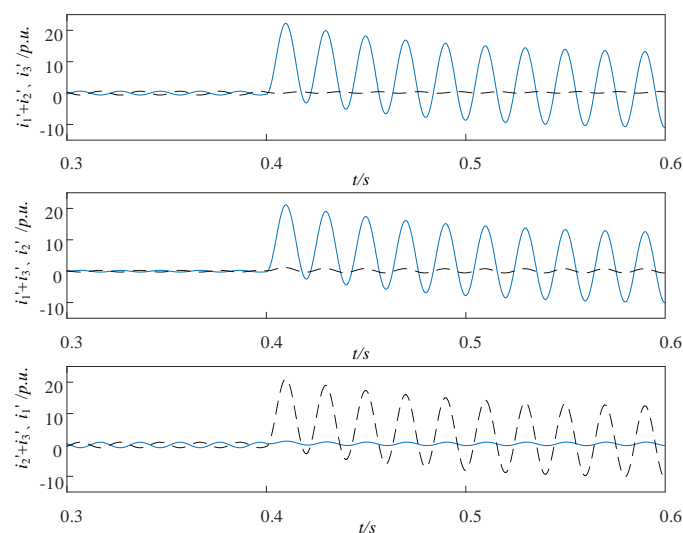
Fig.C1 Three winding transformer model

C.2 三绕组变压器仿真结果

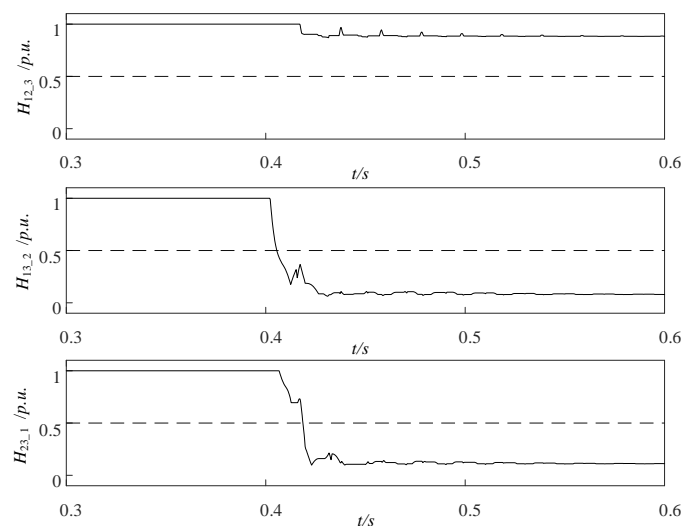
算例 5: 三绕组变压器在 $t=0.4\text{s}$ 时中压侧出口发生三相接地故障。



(a) 变压器三侧电流波形



(b) 两侧电流叠加波形与另一侧电流波形比较图



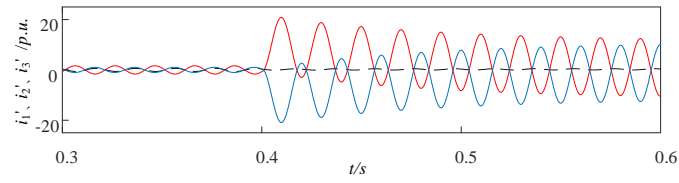
(c) 三组 H 值序列

图 C2 电流波形及 H 值计算结果 (算例 5)

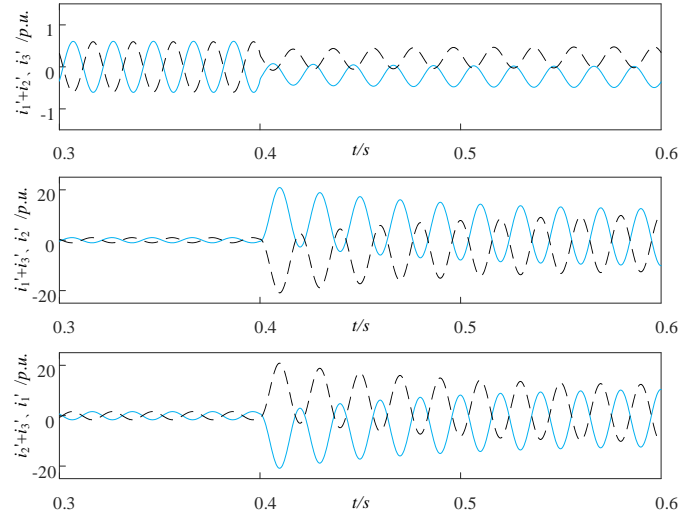
Fig.C2 Current waveforms and value of H for the proposed criterion(Scenario 5)

如图 C2 所示, 波形以 A 相为例, 电流均折算至高压侧, 电流波形采用标么值。(a)为变压器三侧电流波形, 其中红色实线为 i_1' , 蓝色实线为 i_2' , 黑色虚线为 i_3' ; (b)为两侧电流叠加波形与另一侧电流波形比较图, 其中蓝色实线为两侧电流的叠加波形, 黑色虚线为另一侧电流波形; (c)为三组 H 值序列。由图 C2(c)可知, 尽管 $H_{12,3}$ 高于 0.5 的动作门槛值, 即 $P_{12,3}=0$, 但在故障后约 5ms, $H_{13,2}$ 的值已低于 0.5 的动作门槛值, 即 $P_{13,2}=1$, 此时 $P_{12,3} \cup P_{23,1} \cup P_{13,2}=1$, 保护能快速可靠动作。

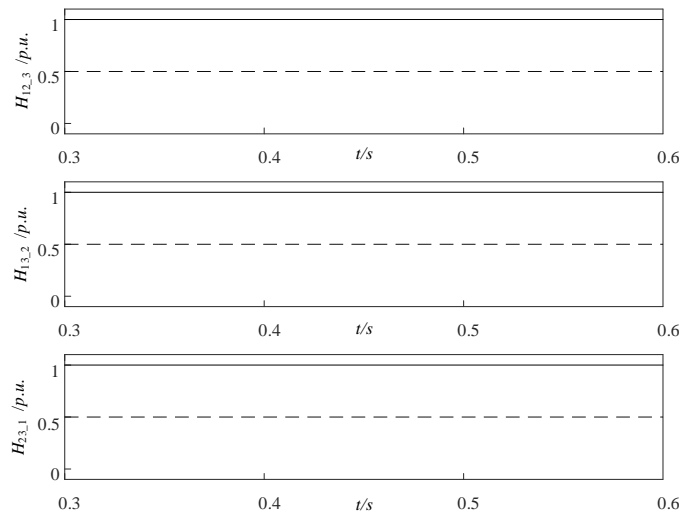
算例 6: 三绕组变压器在 $t=0.4s$ 时中压侧区外发生三相接地故障。



(a) 变压器三侧电流波形



(b) 两侧电流叠加波形与另一侧电流波形比较图



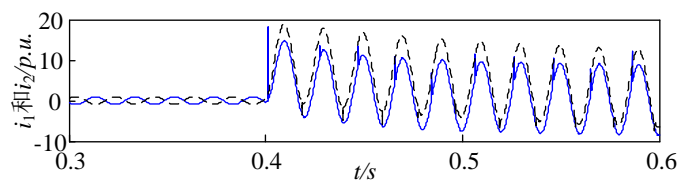
(c) 三组 H 值序列

图 C3 电流波形及 H 值计算结果 (算例 6)

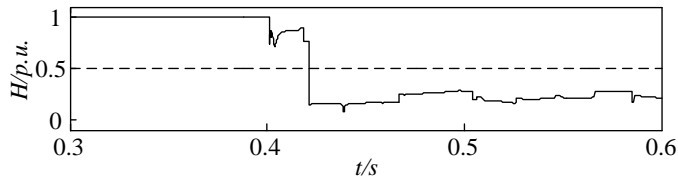
Fig.C3 Current waveforms and value of H for the proposed criterion(Scenario 6)

由图 C3 可知,在发生区外故障时,三组 H 值序列均稳定的高于 0.5 的动作门槛值,即 $P_{12,3}=0$ 、 $P_{13,2}=0$ 、 $P_{23,1}=0$, 此时 $P_{12,3} \cup P_{23,1} \cup P_{13,2}=0$, 保护能可靠闭锁。

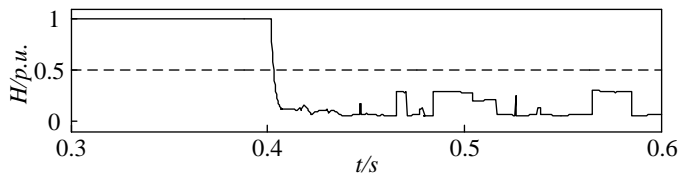
附录 D 抗噪声性能分析



(a) 含噪声的 i_1 和 i_2 波形



(b) 原始判据 H 值计算序列



(c) 改进判据 H 值计算序列

图 D1 两侧电流波形及 H 值计算结果

Fig.D1 Current waveforms and value of H for the proposed criterion

附录 E 动模案例保护动作情况记录表

表 E1 12 组案例保护动作情况记录表

Table E1 Record table of protection action for 12 cases

变压器类型	故障类型	动作情况	动作时长 (故障后)
双绕组 变压器	F_1 处 A 相接地	动作	10 采样点
双绕组 变压器	F_1 处三相接地伴随一 侧 TA 饱和	动作	10 采样点
双绕组 变压器	F_2 处 A 相接地	动作	5 采样点
双绕组 变压器	F_2 处三 相接地	动作	5 采样点
双绕组 变压器	F_3 处 A 相接地	不动作	—

双绕组 变压器	F_3 处三相接地伴随一 侧 TA 饱和	不动作	—
三绕组 变压器	F_1 处 A 相接地	动作	20 采样点
三绕组 变压器	F_1 处 AB 相间短路	动作	20 采样点
三绕组 变压器	F_2 处 A 相接地	动作	10 采样点
三绕组 变压器	F_2 处三 相接地	动作	10 采样点
三绕组 变压器	F_3 处 A 相接地	不动作	—
三绕组 变压器	F_3 处三 相接地	不动作	—