

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190802

基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据

翁汉琍¹, 陈皓¹, 万毅², 饶丹青¹, 刘华³, 李振兴¹, 黄景光¹

(1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡电能有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力有限公司检修公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 传统变压器励磁涌流识别方法在复杂电磁环境以及电流互感器(CT)饱和等情况下会受到干扰而导致保护动作速度变慢或者误动。为解决此问题, 提出一种利用电流波形分布特征识别励磁涌流的变压器差动保护新判据。结合巴氏系数图像匹配算法, 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。并利用PSCAD/EMTDC软件仿真以及动模试验验证了该判据在变压器空载合闸、区内和区外故障、带故障合闸以及CT饱和等工况下的有效性。

关键词: 励磁涌流; 直方图; 图像匹配算法; 巴氏系数; CT饱和

A novel criterion to distinguish inrush current from fault current based on the Bhattacharyya coefficient

WENG Hanli¹, CHEN Hao¹, WAN Yi², RAO Danqing¹, LIU Hua³, LI Zhenxing¹, HUANG Jingguang¹

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Three Gorges Electric Energy Co., Ltd., Yichang 443002, China; 3. Maintenance Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: Because of a complicated electromagnetic environment and Current Transformer (CT) saturation, the conventional methods of transformer inrush current identification may operate with a long time delay or even mal-operate. To solve this problem, a new magnetizing inrush identification method based on the distribution characteristics of the current waveform is proposed. The fault differential current and inrush current are distinguished by comparing the waveform similarity between the differential current and the sinusoidal signal using the Bhattacharyya coefficient. Based on a PSCAD/EMTDC simulation and dynamic experiment tests, the validity of the criterion is verified under the conditions of unloaded transformer energization, internal and external faults, energizations with faults and CT saturation, as well as faults accompanied with CT saturation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106) and Open Foundation of Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station (China Three Gorges University) (No. 2018KJX05).

Key words: inrush current; histogram; image matching algorithm; Bhattacharyya coefficient; CT saturation

0 引言

变压器是电力系统中最重要设备之一, 其安全稳定运行关系到整个电力系统的稳定。而励磁涌流是影响变压器差动保护可靠性最重要的因素^[1-2], 目前科研工作者已提出很多励磁涌流识别方法, 可

分为两大类: 第一类是仅用电流量作为判断基准的识别方法, 如二次谐波制动判据^[3-4]、间断角判据^[5]、波形对称原理^[6-7]和波形相关性原理^[8-11]等; 第二类是综合电流量和电压量作为判据的识别方法, 如磁通特性原理^[12]、基于阻抗原理^[13-14]、差有功原理^[15-16]等。虽然引入电压量使采集的信息更加详细, 在一定程度上提高了保护的可靠性和灵敏度, 但是加入电压互感器(Potential Transformer, PT)不仅增加了投资成本, 同时PT断线也增加了保护误动作的风险。

目前应用于实际的主流保护算法依旧是以电流

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607106); 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)

量作为判据,如二次谐波制动法以及间断角测量法。随着超高压、大容量变压器的发展,电网中装设有无功补偿装置如变压器低压侧串补电容、高压输电线路的分布电容等,在变压器发生内部故障时差流中二次谐波分量上升;而随着铁芯制造工艺的进步,变压器工作磁通提高,饱和磁通降低,励磁涌流中二次谐波含量可能降低至5%以下。上述情况导致二次谐波制动法中的门槛值难以整定。

间断角测量法原理虽然不存在这一问题,但是间断角的测量需要较高的采样率,对保护的硬件要求更高^[17],并且由于一次涌流幅值较高而电流互感器(Current Transformer, CT)存在剩磁等因素的影响,CT容易饱和。在一次涌流的间断部分,由于CT的饱和,将会产生反向二次电流,导致二次涌流波形中间断角减小甚至消失^[18-19]。因此,探究新的方法解决这些问题非常有必要。

涌流和内部故障差流在波形上最大的区别在于内部故障波形保持良好的正弦性,而涌流由于尖顶波和间断角的存在,正弦性较差,因此两者波形分布特征差异较大。本文引入图像匹配算法对差流波形和预测正弦波的正弦特征进行匹配度计算,提出基于巴氏距系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据。该方法主要是借助直方图处理技术分析差流波形和预测正弦波的波形分布特征,并通过巴氏系数计算直方图的匹配程度来实现变压器涌流和故障差流的识别。

1 基于巴氏系数的变压器差动保护原理

1.1 变压器差流波形与正弦波的相似度比较

图1基于双侧电源双绕组变压器电力系统模型,以4kHz为采样频率,在内部故障、空载合闸、区外故障CT饱和、带故障合闸四种情况下分别提取一个周期的差流波形,并与正弦波形比较,其中实线表示差流波形,虚线表示正弦波。

图1(a)—图1(d)可以清楚地呈现出故障情况下,差流与正弦波的相似性好,而非故障情况下,差流波形则不具备正弦特征。

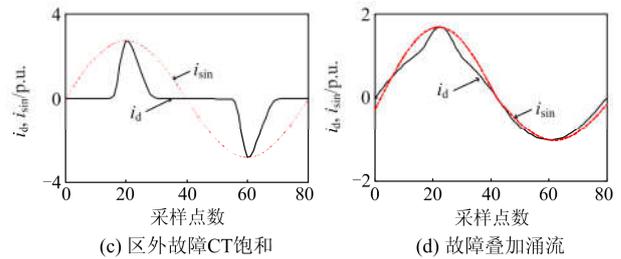
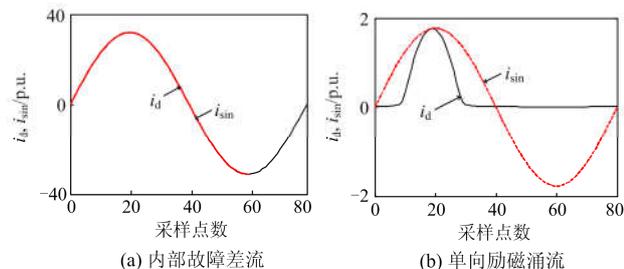


图1 差流 i_d 与其预测正弦波 i_{sin}

Fig. 1 Differential current and its predicted sinusoidal current

目前,有很多方法是通过比较差流和正弦波的波形相似性识别励磁涌流和内部故障^[8-11],并取得了很好的效果,而距离度量与相似度度量在这种判别中最常用。但这两种度量应用于实际中还存在一些问题,尤其易受噪声干扰。

直方图技术是数字图像处理中的一种常用方法,它能提供非常有用的图像信息统计资料^[20],并且具有较强的抗干扰能力。因此借鉴直方图来描述变压器差流的特征,然后再进行匹配度计算,具体步骤如下。

第一步:预测正弦序列的构造(匹配算法中的模板)。

设 I_1 和 I_2 分别为一个数据窗的起点和终点, I_m 为差流的极值,以极值点为基准向前推算 1/4 周波其值记为 I_0 ,统计包含 I_1 和 I_m 之间的采样点数记作 n_1 ,利用公式(1)构造正弦序列的前半段 $y_1(i)$ 。统计 $(I_m, I_2]$ 之间的采样点数记作 n_2 ,利用公式(2)构造正弦序列的后半段 $y_2(i)$ 。

$$y_1(i) = A_m \sin(\pi/2 - [2\pi(n_1 - i)]/N) + b, i = 1, \dots, n_1 \quad (1)$$

$$y_2(i) = A_m \sin(\pi/2 - (2\pi i)/N) + b, i = 1, \dots, n_2 \quad (2)$$

式中: $N = n_1 + n_2$; $A_m = (I_m - I_0)$; $b = I_0$ 。

数据窗内预测正弦序列是 $y_1(i)$ 与 $y_2(i)$ 两曲线拼接而成。若在数据窗内找不到极值点,则延续上一数据窗预测的正弦波。

第二步:分别建立差流和预测正弦波波形的波形直方图,以描述两者的分布特征。

根据第一步所述方法在数据窗内预测出正弦序列,并设其取值为 $[m, n]$,将区间 $[m, n]$ 等分为 W 个子区间(子区间个数可根据实际情况调整,本文取 $W = 20$),依次记作 $1, 2, \dots, W - 1, W$,作为波形分布直方图横坐标。分别统计数据窗内差流序列和对应预测的正弦序列落在每个区间内的个数,并计算其占比 n_i (落在子区间的采样数目与数据窗内总的采样点的比值),作为波形分布直方图纵坐标,以此建立波形分布直方图。

图2(a)以单向励磁涌流波形图为例说明电流波

形分布直方图的建立过程, 在一周波 80 个采样点下, 取数据窗涵盖第 21 至 40 个点(共计 20 点)。预测正弦波如红色虚线所示, 在数据窗内其最大值为 m , 最小值为 n , 将区间 $[m, n]$ 等分为 20 个区间, 以此记作 $1, 2, \dots, 19, 20$ 。

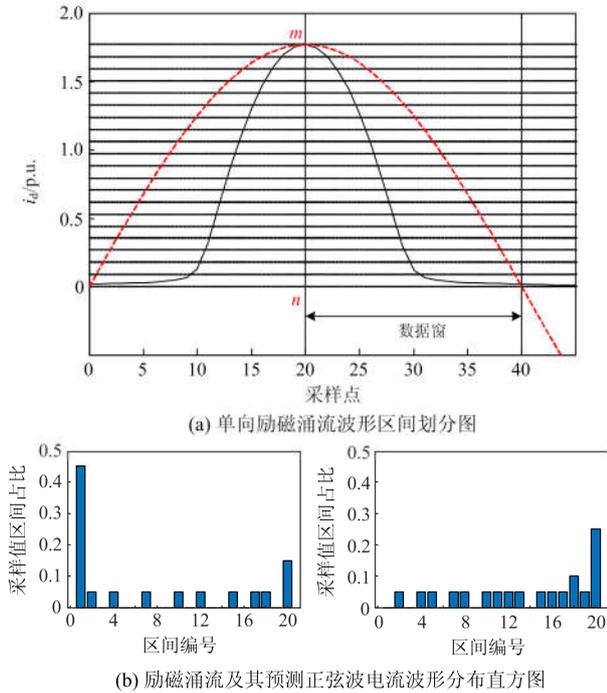


图 2 波形区间划分图以及电流波形分布直方图

Fig. 2 Interval division of inrush current waveform and current waveform distribution histogram

统计各个子区间中励磁涌流和预测正弦波的采样值占比, 得到两组波形直方图函数, 如图 2(b)。

基于以上分析, 电流波形的相似性可以转化成两直方图函数的匹配程度计算。

值得指出的是, 电流采样值易受噪声干扰, 而直方图处理技术是统计差流序列值在各个取值区间的占比, 再进行匹配度计算。因此, 在白噪声干扰下, 差流波形虽然发生了畸变, 但是对落入各个区间的取值个数影响较小, 因此直方图处理技术自带滤波效果, 有很强的抗白噪声能力。

1.2 巴氏系数的定义

巴氏系数是统计学中用于测量两种离散概率分布的可分离性的数学量, 巴氏系数用于计算直方图相似度时有很好的效果, 因此常被应用在图像匹配中以灰度为基准的匹配计算^[21-23]。本文选用巴氏系数作为判断直方图相似性的标准。

对于同一定义域 X , 两离散概率分布 $P(x)$ 、 $Q(x)$, 其巴氏系数定义^[24-25]如下。

$$B_c(P, Q) = \sum \sqrt{P(x) \times Q(x)} \quad (3)$$

由 $0 < P(x) < 1, 0 < Q(x) < 1, \sum P(x) = 1, \sum Q(x) = 1$ 得知 $0 \leq B_c(P, Q) \leq 1$ 。

对于直方图来说, 当直方图分布函数 $P(x)$ 、 $Q(x)$ 重叠程度高, B_c 值越接近于 1; 反之, 直方图分布函数越分离, B_c 值远离 1; 完全分离时, B_c 值为 0。

根据图 2, 两直方图的分布函数如表 1 所示。

表 1 励磁涌流 $P(x)$ 及其预测正弦波电流 $Q(x)$ 波形分布函数表

Table 1 Function table of the sampling value distribution about the inrush current and its predicted sine wave

区间编号	1	2	3	4	5	6	7
$P(x)$	0.45	0.05	0	0.05	0	0	0.05
$Q(x)$	0	0.05	0	0.05	0.05	0	0.05
区间编号	8	9	10	11	12	13	14
$P(x)$	0	0	0.05	0	0.05	0	0
$Q(x)$	0.05	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0
区间编号	15	16	17	18	19	20	
$P(x)$	0.05	0	0.05	0.05	0	0.15	
$Q(x)$	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.25	

将表 1 中数据代入式(3), 计算得到 $B_c = 0.6144$ 。

1.3 基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据

基于巴氏系数算法判别励磁涌流和故障电流的本质是根据电流波形正弦性的差异来实现。基于以上分析已将该差异利用直方图处理技术转化为波形分布直方图的差异性, 通过巴氏系数计算模板(正弦波波形直方图)与差流的匹配程度, 根据巴氏系数大小来判别其为内部故障还是涌流。

在理想情况下, 变压器内部故障差流呈现正弦波波形, 电流波形直方图几乎完全重叠, B_c 值为 1, 而在单向励磁涌流和对称性励磁涌流的情况下, 由于尖顶波和间断角的存在, 差流波形与正弦波相差较大, 电流波形直方图重叠程度低, B_c 值远离 1。若一侧 CT 饱和, 对于区内故障来说, 由于差动电流是一、二次侧电流值的叠加, 虽然饱和侧电流畸变较大, 但差流波形受到的影响较小, B_c 值接近 1; 而对于区外故障来说, 差动电流使一、二次电流值相消, 波形畸变严重, B_c 将远离 1。据此可设定门槛值 $B_{c.set}$ 来识别。

设 $B_{c.set}$ 为保护的门槛值, 当满足式(4), 保护立即动作。

$$B_c > B_{c.set} \quad (4)$$

2 数据窗长选取及整定值确定

(1) 数据窗长度的选择

虽然, 巴氏系数算法能在较广范围内选取数据窗长, 但是数据窗的长短直接影响着新原理的速动性和可靠性。从速动性来说, 数据窗口越小越好, 但是如果数据窗过小, 将不能正确反映波形的差异性特征, 保护有误动的风险。例如考虑受 CT 饱和影响的波形, 由于 CT 进入饱和前一般需要 3~5 ms, 因此为确保数据窗能够涵盖 CT 正确传变部分的波形, 至少需要选择 5 ms 的数据窗长, 即 1/4 周波。因此, 选择 1/4 周波为一个数据窗, 即为 5 ms。

(2) 区间划分个数 W 的取值与整定值确定

区间划分个数 W 的取值与数据窗内采样点的个数相关, 并且影响巴氏系数算法的灵敏性。理论上来说, W 的取值越大, 对数据窗内波形的差异性提取的信息越精确, 反映到直方图上就是差异越明显, 判据的灵敏性越高。但是 W 过大, 会导致波形的差异被异常放大, 从而导致保护误判。因此应该根据实际情况选取合适的 W 值, 一般来说, W 值的选取不超过一个数据窗的采样点数(若超过, 则必定造成某些区间无采样点落入, 不能真实反映波形分布特征)。在高采样率的微机保护中, W 值可在 1/2 和 1 倍的数据窗采样点数之间选取。本文的仿真分析采样频率为 4 kHz, 数据窗为 5 ms, 即一个数据窗的采样点数为 20, 故设置 $W=20$ 。

变压器内部故障差流呈现正弦波波形, B_c 值理想情况下为 1, 但是考虑带故障合闸、CT 饱和等情况时, 电流波形将发生轻微畸变, B_c 值会下降, 因此引入可靠系数来确定门槛值, 整定原则如下。

$$B_{c.set} = B_{c.theory} / K_{rel} \quad (5)$$

式中: $B_{c.theory}=1$; 取 $K_{rel}=1.25$; 则 $B_{c.set}=0.8$ 。

对图 1 中变压器内部故障、带故障合闸、空载合闸、区外故障 CT 饱和和 4 种情况与各自预测的一个周期内正弦波进行直方图处理后, 计算一个周期内巴氏系数序列值, 得到的结果如图 3 所示。

1) 在变压器发生内部故障时, 差流波形与正弦波相似性程度高, 在一个周期内的巴氏系数 B_c 接近 1, 高于门槛值 0.8, 保护动作。

2) 在变压器带轻微故障合闸情况下, 差流波形为故障电流与涌流波形的叠加, 虽然波形发生轻微畸变, 但是前 1/4 波段波形相似性高, 波形分布相似, 巴氏系数计算值大于门槛值 0.8, 保护能正确快速动作。

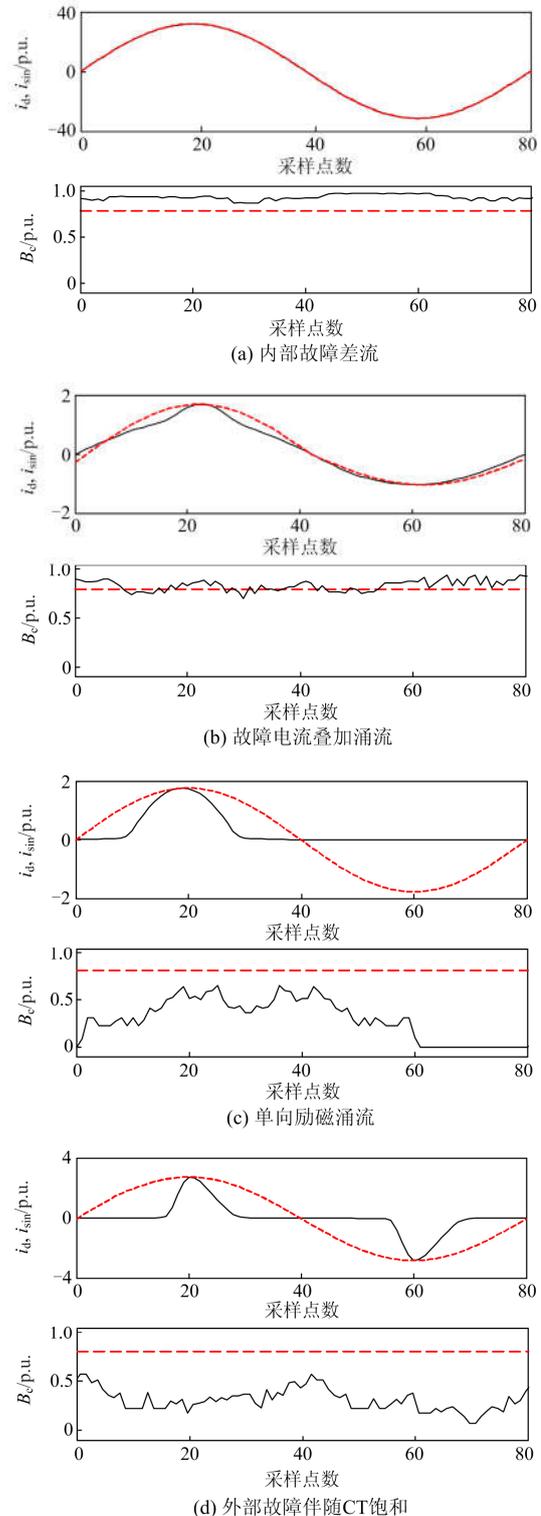


图 3 差流与预测正弦波相似性比较以及巴氏系数 B_c 计算值
Fig. 3 Comparison of the similarity between the difference current and the predicted sine wave and the calculated value of the B_c

3) 单向励磁涌流波形与正弦波相似性程度低, B_c 值稳定低于门槛值 0.8。

4) 对于区外故障 CT 饱和, 差流幅值不再为 0, 启动判据, 由于差流为两侧电流相减, 实际为饱和 CT 异常传变的误差, 其波形与正弦波差异较大, B_c 计算值也稳定低于门槛值 0.8, 保护可靠闭锁。

基于以上分析可以看出, 将门槛值定为 0.8 能保证保护的可靠性和速动性。

3 仿真实验验证

在 PSCAD 平台上建立图 4 所示的双侧电源双绕组变压器仿真模型, 主要参数如下: 系统供电电压为 $E_m=110$ kV, $E_n=35$ kV, 系统频率为 50 Hz。变压器采用 Y/ Δ 接线的可饱和 UMEC 模型, 其额定容量为 100 MVA, 额定电压为 110/35 kV。电流互感器采用 J-A 模型, 变比分别为 $k_1=600/5$ A, $k_2=2000/5$ A。设定仿真时间为 1 s, 采样频率为 4 kHz, 时间窗为 5 ms, 动作门槛值 $B_{c.set}=0.8$ 。仿真结果波形均以 A 相为例, 电流波形采用标么值。

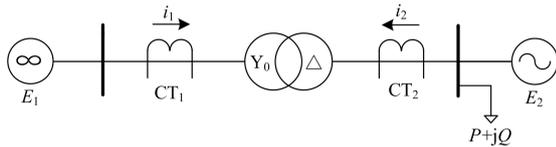


图 4 双侧电源双绕组变压器模型

Fig. 4 Double winding transformer model in double ended source system

3.1 变压器内部故障场景的仿真

算例 1: $t=0.4$ s 时变压器 Δ 侧出口发生三相接地故障, 如图 5。

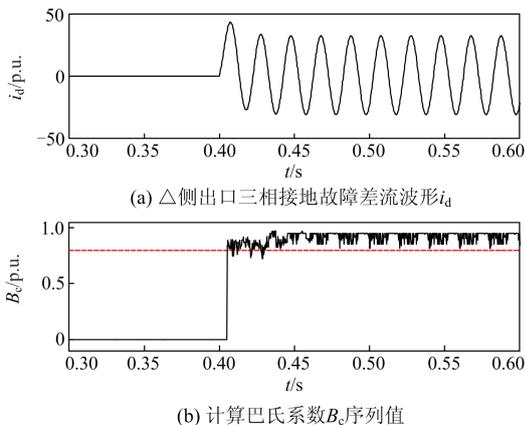


图 5 三相接地故障差流波形及 B_c 计算结果

Fig. 5 Differential current in the three-phase line-to-ground fault and calculation results of B_c

上述算例 1 中, 图 5(a)、图 5(b) 分别是 0.3~0.6 s 时间段差流波形及其计算出的 B_c 值序列。以下算例图形含义相同, 不再重复说明。从 B_c 序列值可以看

到, 判据启动后, 巴氏系数 B_c 在第一个数据窗计算值就迅速越过动作门槛 0.8, 因此此过程只耗费一个数据窗时间, 即 5 ms 后保护即可正确动作。

3.2 涌流场景的仿真

算例 2: 单向励磁涌流

$t=0.4$ s 空载合闸, 变压器三相铁心剩磁均为 0, A 相初相角为 0° , 如图 6。

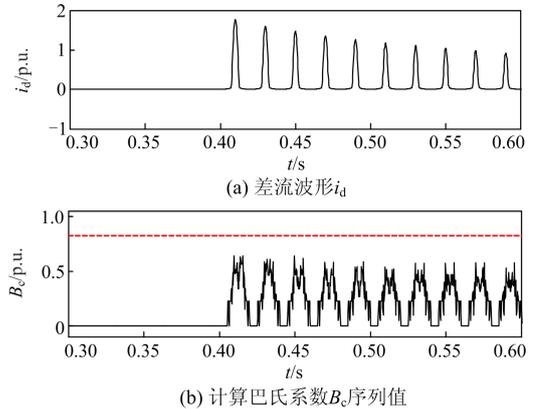


图 6 单向励磁涌流波形及 B_c 计算结果

Fig. 6 Magnetizing inrush current and calculation results of B_c

算例 3: 对称性励磁涌流场景

在 $t=0.4$ s 时, 变压器空载合闸, A 相合闸初相角为 -120° , 如图 7。

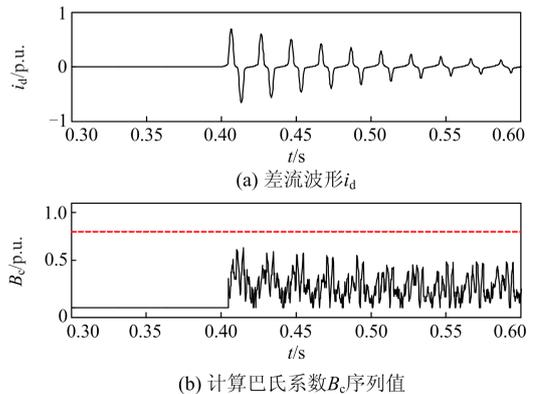


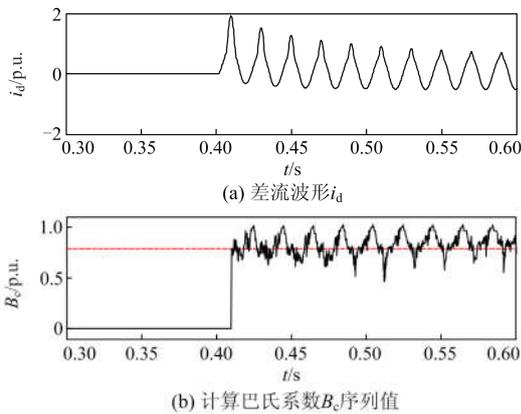
图 7 对称性励磁涌流波形及 B_c 计算结果

Fig. 7 Symmetrical inrush current and calculation results of B_c

算例 2 和算例 3, 虽然对称性涌流拥有良好的对称性, 但是其正弦相似性并不高, 与预测正弦波的差异大, 从图 7(b) 可以看出, 合闸后计算的巴氏系数 B_c 序列值稳定于 0.8 以下, 保护能可靠闭锁。这说明基于巴氏系数的变压器差动保护新原理, 在对称性较好的涌流情况下也能正确闭锁保护。

算例 4: 涌流叠加轻微故障场景

变压器在 $t=0.4$ s 带变压器 Δ 侧 A 相绕组 5% 处发生接地故障空载合闸, 如图 8。

图 8 带故障空载合闸差流波形及 B_c 计算结果Fig. 8 Differential current and calculation results of B_c

算例 4 中, $t=0.4$ s, 变压器带轻微匝间故障空载合闸, 从 B_c 计算值可以看出, 其值在合闸后 8 ms 左右计算值高于阈值 0.8, 保护正确动作。通过差流二次谐波含量图可以看出, 此种情况下, 受占比较大的涌流特征影响, 在带故障合闸后, 差流的二次谐波含量较高, 在仿真时长内一直高于 15% 的制动阈值(如图 9), 二次谐波制动判据将误闭锁保护(或长延时才能开放保护)。而对于巴氏系数算法来说, 考虑波形采样值的数值统计直方图与正弦波的匹配性, 虽然涌流的叠加改变差流波形, 但是对直方图的影响较小, 因此这种场景下, 保护依旧能迅速动作, 避免了传统二次谐波制动判据误闭锁或延迟开放保护的情况。

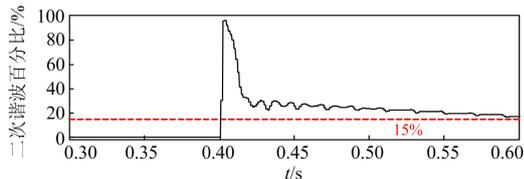


图 9 故障叠加涌流差流二次谐波占基波百分比

Fig. 9 Percentage of second harmonic to fundamental

3.3 CT 饱和场景的仿真

算例 5: 变压器区内故障伴随一侧 CT 饱和

$t=0.42$ s, 变压器 Δ 侧出口发生三相接地故障, 并且伴随 Y 侧 A 相 CT 饱和。

根据图 10 可以看出, 虽然 CT 饱和导致差流波形部分畸变, 但是在未饱和区域, 波形依旧保持正弦性, 故在故障发生 5 ms 后 B_c 值迅速高于阈值 0.8, 保护正确动作。虽然随后在饱和区域 B_c 值低于阈值, 通过在继电保护装置添加自保持回路, 使得接受到动作信号后持续动作不返回, 以此保证判据的可靠执行。对此情况下的差流二次谐波进行

分析(如图 11)可以看出, 在故障发生后 25 ms 内, 差流二次谐波百分比高于 15% 的制动阈值, 保护将在这段时间内被闭锁, 造成动作延时。因此本文所采用的判据较二次谐波制动判据而言, 在区内故障伴随 CT 饱和情况下, 能更加快速、正确地开放保护。

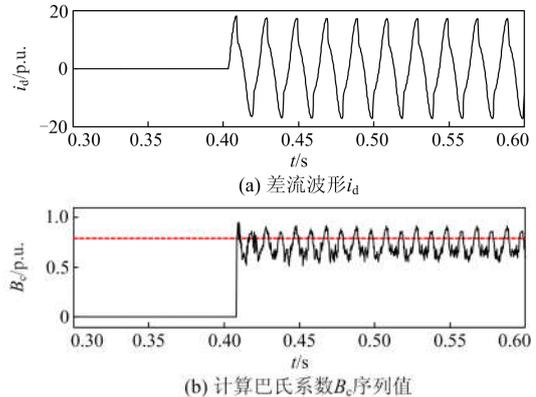
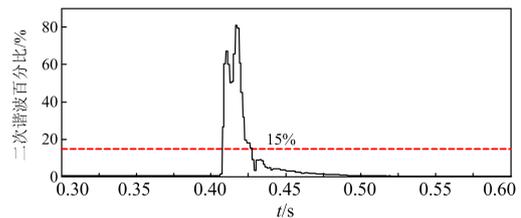
图 10 内部故障伴随 CT 饱和和差流波形及 B_c 计算结果Fig. 10 Differential current and calculation results of B_c 

图 11 内部故障伴随 CT 饱和和差流二次谐波占基波百分比

Fig. 11 Percentage of second harmonic to fundamental

算例 6: 变压器区外故障伴随一侧 CT 饱和
 $t=0.42$ s, 变压器 Δ 侧区外发生三相接地故障, 并且伴有 Y 侧 A 相 CT 饱和。

变压器 Y 侧 CT 饱和导致差流值不再为 0, 并且幅值越限, 启动巴氏系数算法。对此情况下的差流二次谐波分析如图 12 所示, 可以看出, 在故障发生 30 ms 左右, 差流二次谐波含量低于二次谐波判据的阈值 15%, 传统识别方法可能发生保护误动作。然而从图 13(b)可以看出, B_c 值稳定低于阈值 0.8, 保护可靠闭锁。巴氏系数算法在变压器区外故障并且伴随一侧 CT 饱和情况下, 能够正确识别, 避免了采用传统二次谐波制动判据保护误动的风险。

算例 7: $t=0.4$ s 变压器空载合闸, 并且变压器 Y 侧 A 相 CT 饱和。

从图 14(a)可以看到, CT 传变前的一次涌流波形存在明显间断, 具有最普遍的涌流波形特征。但是根据文献[17], CT 饱和后有很大部分的一次涌流

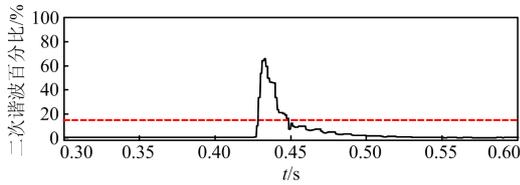


图 12 区外故障伴随 CT 饱和差流二次谐波占比

Fig. 12 Percentage of second harmonic to fundamental

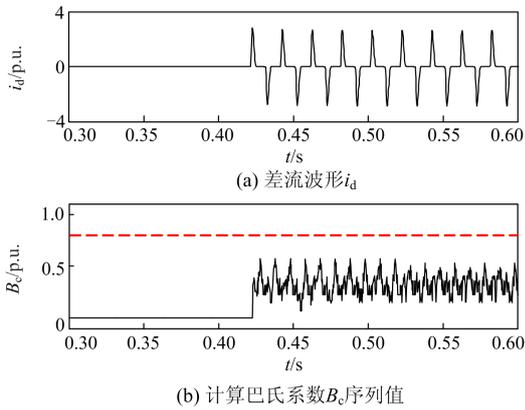


图 13 区外故障伴随 CT 饱和时差流波形及 B_c 计算结果

Fig. 13 Differential current and calculation results of B_c

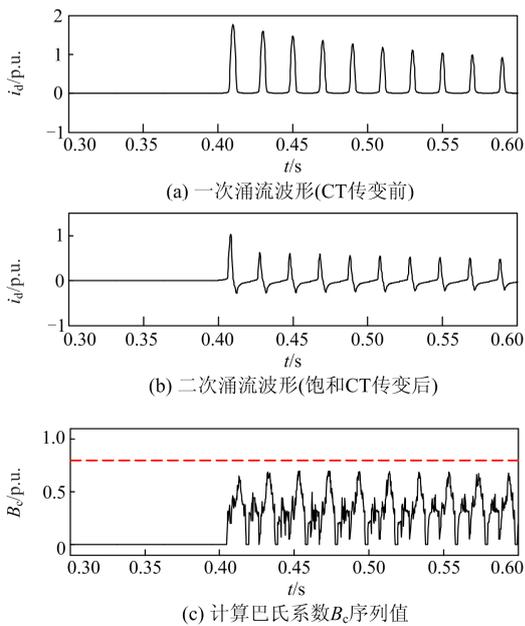


图 14 励磁涌流下 CT 饱和及 B_c 计算结果

Fig. 14 Differential current and calculation results of B_c

会流入励磁支路, 在励磁支路中发生磁能储藏, 虽然一次涌流进入间断区域, 但此时 CT 励磁支路却开始向负载回路释放磁能, 产生反向二次电流, 导致二次涌流波形中间断角消失, 如图 14(b)所示, 这种情况下间断角判据方法将失效。但是, 虽然二次

涌流间断消失, 但其在间断部分的波形是反向衰减的直流分量, 正弦相似性很低, 因此, 可采用本文所提巴氏系数判别法, 其结果如图 14(c), 可以看到 B_c 计算值一直稳定低于门槛值 0.8, 保护被可靠闭锁。

4 动模实验

动模试验装置用三个单相变压器(额定容量为 2 kVA, 变比为 462:200 V)通过 Y/△接线方式连接而成的三相变压器, 模拟额定容量 500 kVA, 变比 500/220 kV 的变压器, 两者在时间常数、瞬态电抗、励磁电流、磁路上等效, 等效的动模试验系统模型如图 15 所示。

试验系统频率为 50 Hz, 采样频率为 6 kHz, 即每周波 120 点, 数据窗设置为 1/4 周波(30 个采样值), 记录干扰前后共 800 个采样点电流数据。

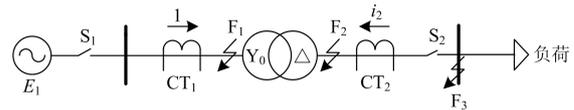


图 15 动态模拟试验系统模型

Fig. 15 System model of dynamic analog experiment

试验案例共 6 组, 如下。

1) 接地故障(3 组): B 相接地故障(F_1)、相间故障(ABF_2 、 BCF_1)、匝间故障(F_1)。

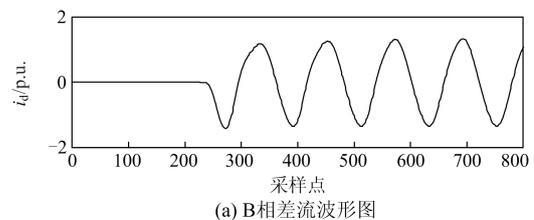
2) 涌流(3 组): 空载合闸(单向励磁涌流和对称性励磁涌流)、带 B 相接地故障合闸(F_1)。

试验表明, 在故障情况下, 新的判据在耗费一个数据窗计算时间后, B_c 值都高于门槛值, 保护快速动作。而在涌流情况下, B_c 值一直低于门槛值, 保护闭锁。通过动模试验验证了该判据的有效性。限于篇幅, 下文给出 4 组试验记录的差流波形和所提判据验证结果。

试验 1: 匝间故障

变压器在 243 个采样点对应时刻 Y_0 侧 B 相 4.35%绕组短路。

由图 16 可看出, 计算的 B_c 值序列在第 273 个采样点对应时刻高于 0.8 的门槛值, 保护在故障发生 1/4 周波即可快速动作。



(a) B 相差流波形图

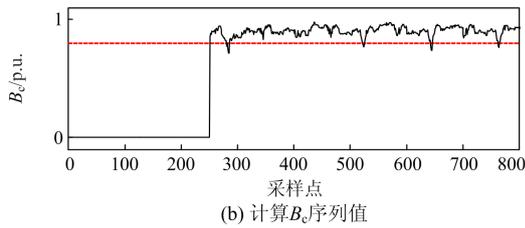


图 16 区外故障 CT 饱和差流波形及计算 B_c 序列值
Fig. 16 Differential current and calculation results of B_c

试验 2: 空载合闸(单向励磁涌流)(图 17)

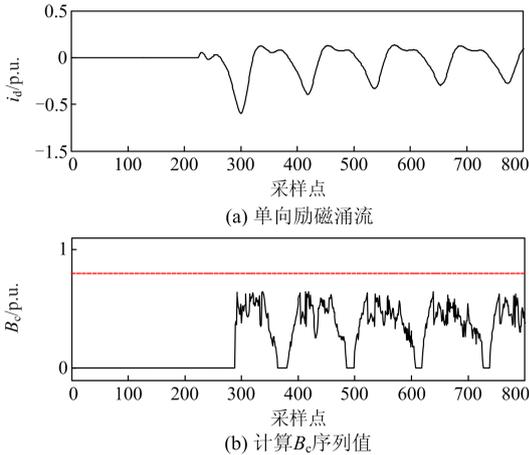


图 17 差流波形及计算 B_c 序列值
Fig. 17 Differential current and calculation results of B_c

试验 3: 空载合闸(对称性励磁涌流)(图 18)

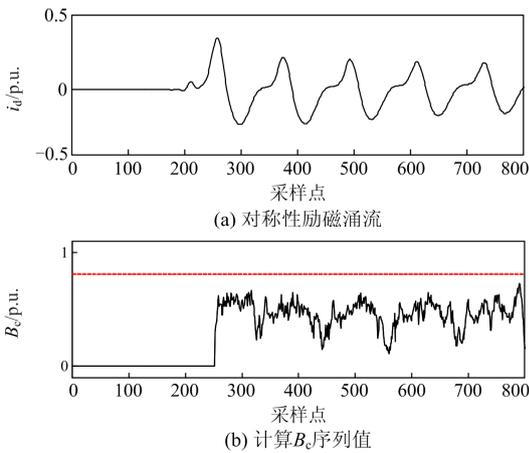


图 18 差流波形及计算 B_c 序列值
Fig. 18 Differential current and calculation results of B_c

从计算结果可以看出, 单向涌流和对称性励磁涌流情况下, B_c 序列值均稳定低于门槛值 0.8, 保护被可靠闭锁。

试验 4: 带故障合闸

在第 268 个采样点带 Y_0 侧 B 相接地故障合闸。从图 19 的计算结果可以看出, 在带故障合闸后

第 30 个点计算 B_c 序列值高于门槛值 0.8, 保护动作, 验证该判据在此情况下的有效性。

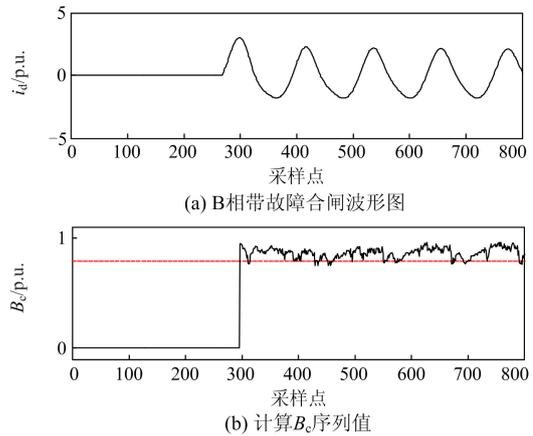


图 19 差流波形及计算 B_c 序列值
Fig. 19 Differential current and calculation results of B_c

5 结语

本文基于差流波形正弦性的差异, 利用巴氏系数算法在图像匹配算法上的优势, 提出基于巴氏系数算法的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据, 并进行仿真和动模试验验证。结果表明本文提出的新判据不仅能快速区分励磁涌流和故障差流, 而且在由于 CT 饱和导致二次电流畸变的情况下, 判据依然有效。本文对比二次谐波制动判据进行分析, 在二次谐波制动判据可能误闭锁(或延时开放)保护、或使保护误动的工况下, 本文判据均能做出正确判别, 避免保护错误动作。

巴氏系数算法是将图像匹配算法应用在变压器差动保护的一种新的尝试。它原理简单、速动性好, 并且具备良好的抗干扰能力。在微机技术的快速发展下, 随着采样频率的增加, 数据窗内采样点的增多使电流波形序列反映在直方图的信息更加精确, 巴氏系数计算的优势将会进一步显现。

参考文献

- [1] 葛宝明, 王祥瑞, 苏鹏声, 等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 1-5, 30.
- GE Baoming, WANG Xiangheng, SU Pengsheng, et al. Double wavelets measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 1-5, 30.
- [2] 黄少锋, 李姗姗, 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.
- [3] 邱文征, 陈德树. 两种励磁涌流二次谐波制动判据的比较[J]. 电力自动化设备, 1998, 18(3): 8-9, 12.
- QIU Wenzheng, CHEN Deshu. Comparison between two restraint criteria of the magnetizing inrush 2nd harmonic[J]. Electric Power Automation Equipment, 1998, 18(3): 8-9, 12.
- [4] 王育学, 潘远林, 刘玮, 等. 电流互感器暂态特性对涌流传变的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 80-86.
- WANG Yuxue, PAN Yuanlin, LIU Wei, et al. Effect of CT transient characteristics on transfer of inrush[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 80-86.
- [5] 卢雪峰, 王增平, 徐岩, 等. 基于波形间断角原理识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 继电器, 2007, 35(增刊): 1-4.
- LU Xuefeng, WANG Zengping, XU Yan, et al. A new method to identify inrush current based on the principle of dead angle[J]. Relay, 2007, 35(S): 1-4.
- [6] 焦邵华, 刘万顺. 区分变压器励磁涌流和内部短路的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 35-38.
- JIAO Shaohua, LIU Wanshun. A novel scheme to discriminate inrush current and fault current based on integrating the waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 35-38.
- [7] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42-46.
- SUN Zhijie, CHEN Yunlun. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing in-rush current[J]. Electric Power Automation Equipment, 1996, 20(4): 42-46.
- [8] 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): 14-20.
- 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): 14-20.
- [9] 索南加乐, 焦在滨, 张怿宁, 等. 基于波形系数的变压器励磁涌流快速识别算法研究[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 71-76.
- SUONAN Jiale, JIAO Zaibin, ZHANG Yining, et al. A fast algorithm to identify inrush current based on waveform factor[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 71-76.
- [10] 郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴. 一种基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 35-42.
- GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing. A new method of inrush current identification based on partial Hausdorff distance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 35-42.
- [11] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 54-59.
- HE Jinghan, LI Jingzheng, YAO Bin, et al. A new approach of transformer inrush detected based on the sine degree principle of current waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 54-59.
- [12] 赵永彬, 陆于平. 基于磁通对称特性的变压器励磁涌流判别新算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 66-71.
- ZHAO Yongbin, LU Yuping. A new algorithm based on flux symmetry character for judging transformer inrush current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 66-71.
- [13] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 92-95.
- ZONG Hongliang, JIN Huafeng, ZHU Zhenfei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 92-95.
- [14] 郑涛, 刘万顺, 庄恒建, 等. 基于改进型序阻抗原理的变压器保护方案[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 67-71.
- ZHENG Tao, LIU Wanshun, ZHUANG Hengjian, et al. Study of a transformer protective scheme based on the improved sequence impedance algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 67-71.
- [15] 古斌. 基于功率量的电力变压器保护新原理及高速算法研究[D]. 西宁: 广西大学, 2014.
- [16] 马静, 王增平, 吴劼. 基于广义瞬时功率的新型变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 78-83.
- MA Jing, WANG Zengping, WU Jie. A novel principle of transformer protection based on generalized instantaneous

- power[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 78-83.
- [17] SACHDEV M S, SIDHU T S, GILL H S. 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.
- [18] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 吴煜, 杨爱萍, 章宦记, 等. 基于黎曼与巴氏距离的脑磁图信号分类方法[J]. 计算机科学与探索, 2017(5): 776-784.
WU Yu, YANG Aiping, ZHANG Huanji, et al. MEG signals classification algorithm based on Riemann and Bhattacharyya distances[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2017(5): 776-784.
- [22] 田红彬. 基于双边滤波和巴氏距离的红外小目标检测[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(10): 1159-1163.
TIAN Hongbin. Infrared small target detection based on bilateral filter and Bhattacharyya distance[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2014, 34(10): 1159-1163.
- [23] 曹妍妍, 崔志明, 吴健, 等. 基于巴氏度量的车辆违章变道快速检测方法[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2011, 31(3): 1-7.
CAO Yanyan, CUI Zhiming, WU Jian, et al. The fast detection method for abnormally vehicle behavior based on Bhattacharyya distance measure[J]. Journal of Suzhou University: Engineering Edition, 2011, 31(3): 1-7.
- [24] 翁汉琍, 陈皓, 万毅, 等. 基于 Bhattacharyya 距离算法的线路纵联保护新判据[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 751-760.
WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. Bhattacharyya distance algorithm based criterion applicable to transmission line pilot protection[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 751-760.
- [25] CHOI E, LEE C. Feature extraction based on the Bhattacharyya distance[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(8): 1703-1709.

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-09-19

作者简介:

翁汉琍(1980—), 女, 博士, 副教授/高级工程师, 研究方向为电力系统分析、继电保护与控制; E-mail: honey_weng@163.com

陈皓(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: 727397340@qq.com

(编辑 许威)