

基于 Hausdorff 距离算法的自适应线路差动保护方案

李一泉¹, 吴梓亮¹, 王峰¹, 曾耿晖¹, 陈志光¹, 罗跃胜¹, 朱晓彤²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心 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; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:为同时提高传统电流差动保护的速动性、灵敏性与安全性,提出一种基于 Hausdorff 距离算法的自适应线路差动保护方案。该方案应用 Hausdorff 距离算法对线路两侧电流进行实时短窗计算,并据此调整保护制动系数,以提高保护的耐受过渡电阻及抗电流互感器饱和能力,具有自适应、免整定的优良特性。基于 PSCAD 的仿真测试验证了所提方案的可行性及优越性。

关键词:自适应;差动保护;继电保护;Hausdorff 距离;高阻故障;电流互感器饱和;免整定

中图分类号:TM 773

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.026

0 引言

电流差动保护因其良好的选择性及高度可靠性,在线路保护中得到了广泛的应用^[1-2],其动作速度、带过渡电阻能力以及抗电流互感器 CT (Current Transformer) 饱和性能一直是国内外的研究焦点。

近年来,专家学者提出了较多研究方案,力图从各方面提升电流差动保护的性能。在提升保护速动性方面,文献[3]提出基于小矢量算法的短数据窗算法,文献[4]提出基于相关分析的暂态电流差动保护,文献[5]提出基于积分思想的采样值差动保护。上述保护方案提高了保护动作速度,但保护整定较为复杂。在提升差动保护带过渡电阻能力方面,文献[6]提出了基于故障分量的差动保护;文献[7]提出一种改进的稳态量差动判据,能够显著提高判据的耐受过渡电阻能力。在 CT 饱和识别方面,文献[8]提出谐波制动法,基于二次电流中的谐波含量识别 CT 饱和;文献[9]提出基于小波变换的波形突变识别法;文献[10]提出基于相关分析的饱和识别法。但是,上述方案所选取数据窗长度及算法的复杂程度严重限制了它们的应用。综上可见,现有文献在灵敏度、动作速度和抗 CT 饱和方面均进行了研究,并取得了一定的研究成果,但是,这些方法可能由于引入电压量、采样率需求较高,导致保护的复杂程度增加,而引入的抗 CT 饱和方案又将降低保护的動作速度,并且在应对高阻故障的能力方面还有提高的余地。可见,由于同时提高保护的動作速度、灵敏性和可靠性之间往往存在矛盾,上述文献均存在一定的不足之处,难以在保护速动性、灵敏性与安全性之间同时取得最优。同时,现有算法的门槛

值一般通过大量仿真整定,可能给工程实用带来一定的难度。鉴于电流差动保护在输电线路主保护中举足轻重的地位,进一步研究一种具备自适应特性的差动保护方案具有重大意义。

基于 Hausdorff 距离的波形相似度比较算法因其时间窗短、计算量小,能针对性地识别波形特征,在几何建模、图像识别等领域得到了广泛应用^[11],已有专家学者将其引入电力系统领域。文献[12]提出一种基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据,文献[13]提出一种基于波形相似度比较的线路快速纵联保护算法。上述研究为 Hausdorff 距离算法在电力系统继电保护中的应用奠定了良好的基础。但是,文献[13]利用线路空载电容电流进行保护整定,并据此设置固定门槛,未考虑互感器不平衡电流造成的影响。特别是在区外故障短路电流较大时,不平衡电流也较大,可能造成保护的误动作。而比率制动式差动保护能够根据短路电流的大小调整差动保护的動作门槛,规避了互感器不平衡电流的影响^[14]。因此,可将 Hausdorff 距离引入电流差动保护,进而研究一种免整定、自适应的保护方案,以消除保护整定存在的问题。

针对电流差动保护进一步权衡其速动性、灵敏性以及可靠性的需求,本文基于 Hausdorff 距离算法,结合电流在各种不同故障场景下的波形特征进行实时短窗计算,提出一种自适应电流差动保护方案。基于 PSCAD 的仿真表明,本文所提算法原理简单,動作速度快,无需保护整定,并且具有优异的带过渡电阻及抗 CT 饱和能力。相较于传统的比例制动式电流差动保护,本文保护方案显示出了较高的优越性,具有良好的工程应用前景。

1 Hausdorff 距离算法基本原理

Hausdorff 距离用于衡量空间上两点集之间的距离^[11-13]。假设空间内存在两点集分别为:

收稿日期:2019-05-10;修回日期:2019-05-17

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJQQ-20161176)

Project supported by Guangdong Power Grid Co., Ltd. (GDKJQQ-20161176)

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\} \quad (1)$$

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_p\} \quad (2)$$

定义点集 A 到 B 的单向 Hausdorff 距离为:

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

其中, $\|\cdot\|$ 表示两点之间的距离范数(如欧氏距离)。式(3)意义如下:计算点集 A 中某点 a_i 到点集 B 的最小距离,则点集 A 到 B 的单向 Hausdorff 距离表示点集 A 中所有点与点集 B 的最小距离中的最大值。

同理,定义点集 B 到 A 的单向 Hausdorff 距离为:

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|a - b\| \quad (4)$$

则 A, B 之间的 Hausdorff 距离定义为点集 A 到 B 与点集 B 到 A 的单向 Hausdorff 距离中的较大者,如式(5)所示。

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

可见, Hausdorff 距离可表示两点集之间的最大不匹配程度。而在线路电流差动保护中,两端 CT 采集得到的电流信号同样可以看作以时间为横坐标、电流采样值为纵坐标的采样序列。由此,可考虑采用 Hausdorff 距离刻画两电流信号之间的不匹配程度(或相似程度),并将其应用至电流差动保护,以构造一种自适应的差动保护方案。

2 基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案

2.1 方案设计原理

以图 1 所示系统为例说明自适应差动保护方案设计的基本原理,当线路 L 发生区外故障时,两侧电流 I_M, I_N 的相位相差 180° ,将某端电流取反相后(假设线路 M 侧为参考侧,对 N 侧电流反相),理论上两电流信号 $I_M, -I_N$ 将完全重合。此时,两电流采样序列的 Hausdorff 距离计算值 $H(I_M, -I_N)$ 将保持接近为 0 的状态。而当发生线路区内故障时,上述两电流信号 I_M 与 $-I_N$ 将接近反相,波形差异较大,其 Hausdorff 距离计算值 $H(I_M, -I_N)$ 也将远大于 0。

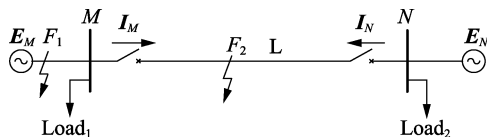
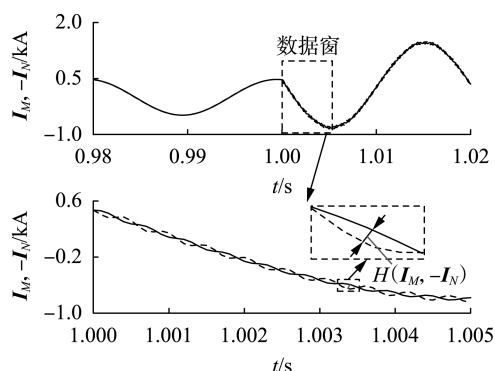


图 1 线路电流差动保护简化模型

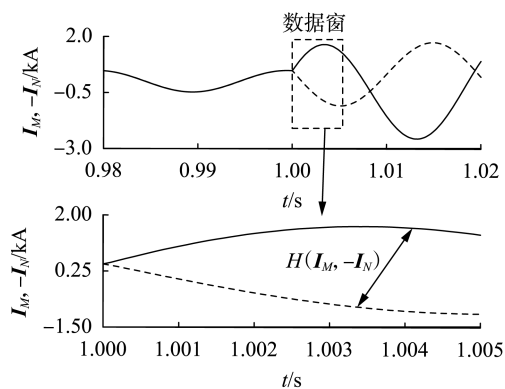
Fig.1 Simplified model of line current differential protection

考虑到 Hausdorff 距离算法的应用对象为一段时间内的两采样序列,因此只要采样频率满足要求,理论上可将算法数据窗取得足够短。结合实际情况,本文选取故障发生后 5 ms 的数据对两电流采样序列进行 Hausdorff 距离计算。区内、外故障的电流

波形及其 Hausdorff 距离的示意图如图 2 所示。



(a) 区外故障



(b) 区内故障

— I_M , --- $-I_N$

图 2 区内、外故障电流波形及 Hausdorff 距离示意图

Fig.2 Diagram of current waveforms and Hausdorff distance under internal and external faults

图 2 中,两电流波形的 Hausdorff 距离计算值 $H(I_M, -I_N)$ 如“ $\longleftrightarrow$ ”所示。由图 2 可知,故障发生时刻 $t=1$ s,在故障发生后 5 ms 内,区内、外故障下的 $H(I_M, -I_N)$ 存在较大的差异,这种差异可作为自适应差动保护方案的基础。

2.2 保护判据

借鉴传统的相量和差比率制动判据,本节提出如下自适应差动保护判据:

$$|I_M + I_N| > f(H(I_M, -I_N)) |I_M - I_N| + I_{op0} \quad (6)$$

其中, $f(H(I_M, -I_N))$ 为基于 Hausdorff 距离的函数方程,可作为差动判据的自适应制动系数; I_{op0} 为很小的启动门限。

式(6)即为自适应差动保护方案的基本形式。首先计算故障发生后 5 ms 内 I_M 与 $-I_N$ 的 Hausdorff 距离值 $H(I_M, -I_N)$,根据计算结果的大小自适应地调整制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 。当计算结果较小时,初步判定为发生区外故障,并增大制动系数,而当计算结果较大时,初步判定为发生区内故障,并降低制动系数。式(6)在比例制动平面上的动作特性曲线如图 3 所示。

为使本文设置的制动系数函数 $f(H(I_M, -I_N))$

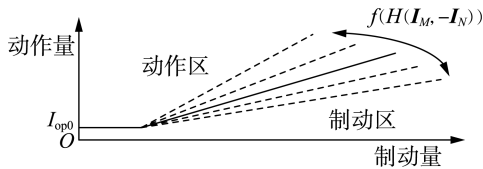


图3 自适应差动保护方案动作特性示意图

Fig.3 Operating characteristics diagram of self-adaptive differential protection scheme

满足传统差动保护中制动系数的取值范围,对 $H(I_M, -I_N)$ 进行“标准化”处理,即计算数据窗内两电流的幅值大小 $|I_M|$ 、 $|-I_N|$,选取其中较大者 $I_{\max}$ 作为基准,则制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 计算如下:

$$f(H(I_M, -I_N)) = 1 - \frac{H(I_M, -I_N)}{2I_{\max}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),即可得到基于 Hausdorff 距离的自适应差动保护判据:

$$|I_M + I_N| > \left[1 - \frac{H(I_M, -I_N)}{2I_{\max}} \right] |I_M - I_N| + I_{op0} \quad (8)$$

经过式(7)的“标准化”处理后,制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 的计算值范围为 $[0, 1]$ 。当发生区内金属性接地故障时,可能出现两电流幅值相等、相位几乎完全相反的情况,此时 $H(I_M, -I_N) = 2I_{\max}$, $f(H(I_M, -I_N)) \approx 0$,式(8)所示的动作特性接近为一条水平直线,动作区将增大,如图4(a)所示。而当发生区外故障时, $H(I_M, -I_N)$ 将非常小,此时制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 接近 1,式(8)所示动作特性的曲线斜率非常高,制动区将增大,如图4(b)所示。

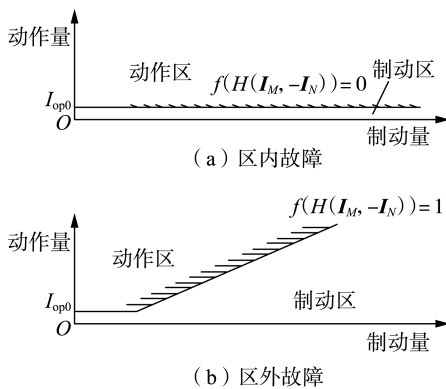


图4 区内、外故障自适应差动保护方案动作特性

Fig.4 Operating characteristics of self-adaptive differential protection scheme under internal and external faults

对于传统的比率制动式差动保护,其制动系数 K 的取值范围为 $0 \sim 1$,且为一定值,这种取值方式无法平衡差动保护的灵敏性与安全性。而本文所提的自适应差动保护判据能够根据 Hausdorff 距离的计算值,自适应地调节制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 以改变制动平面上的动作特性曲线,即发生区外故障时增大制动区,发生区内故障时增大动作区,以在最大程度上保证差动保护的内部故障灵敏性及区外故障安

全性同时取得最优。

3 基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护性能分析

3.1 区外故障伴随 CT 饱和

当发生故障时,流过 CT 的故障电流可能非常大,导致 CT 磁通很快达到饱和,此时二次电流会出现严重的畸变,这种畸变波形不仅无法传递系统正确的信息,甚至会导致差动保护误动作。

假设图2所示线路 N 侧 CT 发生饱和,此时两侧 CT 二次电流 I_M 、 $-I_N$ 波形如图5所示。 $t=1$ s 时 F_1 处发生区外故障,一次电流迅速增大,而此时由于发生饱和, N 侧 CT 二次电流将产生畸变,无法正确传变一次电流。

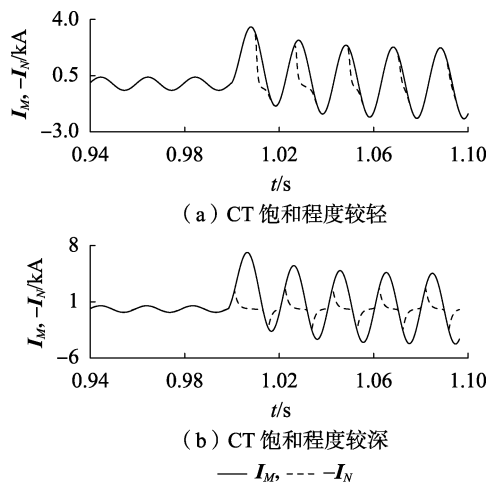


图5 区外故障伴随 CT 饱和情况下的电流波形

Fig.5 Waveforms of currents under external fault with CT saturation

根据图5可知,当 CT 发生不同程度的饱和时,其传变的二次电流将产生不同程度的畸变,并且在饱和发生时刻即与正常情况下的故障电流产生较大差异。一般情况下,从故障发生到 CT 饱和会经历一段时间(一般不小于 $1/4$ 个周期),在这段时间内,CT 能够正确传变故障电流,如图5(a)所示。然而,当故障电流、CT 二次负载过大时,CT 可能在故障发生后 5 ms 内即进入深度饱和的状态,如图5(b)所示。对于较为轻微的 CT 饱和,由于故障后 5 ms 内 I_M 、 $-I_N$ 与单纯的区外故障波形特征一致,故其 $H(I_M, -I_N)$ 将非常小,根据式(8),此时的动作特性曲线见图4(b)。而对于极为严重快速的 CT 饱和,尽管故障后 5 ms 内 $-I_N$ 波形已产生畸变,然而从图5(b)中可以看出,此时 $H(I_M, -I_N)$ 必定小于 $I_{\max}$ (即 I_M 的幅值),根据式(7),制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 将大于 $1/2$,故其动作特性曲线将处于图4(a)与(b)所示范围之内,且更加偏向于图4(b)。

由此可见,在发生区外故障且某侧 CT 饱和的场景下,本文所提差动保护方案将自适应地增大制动

系数以增大差动保护制动区,通过这种自适应地调节方式,判据能够完全免疫 CT 轻度饱和的情况,并在 CT 深度饱和的场景下也能最大程度保证保护的安全性。

需要指出的是,在发生区内故障伴随 CT 饱和的情况下,由于故障初始阶段,CT 仍能正确传变故障电流,在此期间内,故障电流仍然呈现 2.1 节中典型的区内故障特征,两侧电流的 $H(I_M, -I_N)$ 较大。根据式(7)、(8),制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 仍较小,动作特性接近为一条水平直线,动作区非常大,如图 4(a)所示。此时,自适应差动保护判据仍具有较高的灵敏度。由此可见,当发生区内故障时,所提保护判据能够保证保护的正确动作,不受 CT 饱和的影响。

3.2 区内高阻故障

当线路发生区内非金属性接地故障时,随着过渡电阻的增加,故障电流将减小,且两侧电流 I_M 、 $-I_N$ 相位差逐渐变小,甚至可能出现同相的情况。此时由于故障特征不明显,传统的差动保护判据可能未能正确动作。

图 6 为发生区内带过渡电阻故障时两侧电流波形示意图。由图可知, $t=1$ s 时 F_2 处发生区内故障,随着过渡电阻的增大,尽管故障电流及两电流 I_M 与 $-I_N$ 的 Hausdorff 距离值将逐渐减小,然而由于式(7)的“标准化”过程是将 $H(I_M, -I_N)$ 与故障电流幅值作商处理,故判据的制动系数 $f(H(I_M, -I_N))$ 的变化幅度不大,可保持在较低的水平,故其动作区仍然较大。可见,基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案不受故障电流大小的影响,能够在区内高阻故障的情况下最大程度地提高差动保护的灵敏度。

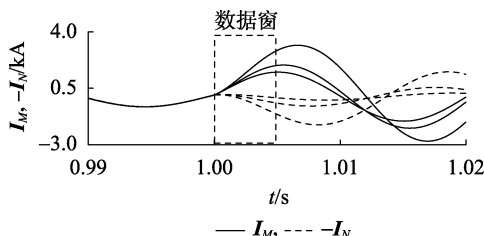


图 6 发生区内高阻故障时的电流波形

Fig.6 Current waveforms under internal high-resistance fault

3.3 线路电容电流影响分析

线路的分布电容容易导致正常运行及区外故障时的两端电流之和不为 0。在线路空载或轻载的情况下(制动量几乎为 0),本文所提方案与传统的差动保护判据的抗电容电流能力相当,都是通过图 3 所示差动平面中的 I_{op0} 躲过线路空载情况下的电容电流。但是,在线路正常带负荷状态或发生区外故障的情况下,所提保护方案的抗电容电流能力是优于传统差动保护判据的,分析如下:如果不考虑电容电流,根据图 2(a),此时两侧电流 I_M 与 $-I_N$ 理论上应当完全重合,制动系数将自适应地调节为 1,保护

的制动区域足够大;考虑电容电流的影响后,两侧电流虽然会产生一定的差异,但是,由于此时流经线路两侧的电流幅值较大,对应式(7)中的 I_{max} 也较大,从而使得经“标准化”处理后, $f(H(I_M, -I_N))$ 仍然接近于 1,此时,制动区域仍然较大,相比于传统的差动保护判据,其保护动作的安全性更为优越。

3.4 判据速动性分析

传统的差动保护算法通常采用全周傅氏滤波算法,数据窗长度为 1 个周期,即 20 ms。该数据窗实际上为滑动数据窗,在滑动过程中,随着数据窗内故障数据的增多,差动平面中的动作轨迹也将有所变化。但是,本文所提方案采用故障后 5 ms 两侧电流的 Hausdorff 距离值,为固定的时间窗,并且根据计算结果调节制动系数。这意味着在故障发生后 5 ms 时,制动系数已经自适应地调节完毕,停止 Hausdorff 距离的计算流程。此时,开始进行保护判断:如果工作点已经位于动作区内,保护立刻动作;如果工作点位于制动区,则差动保护数据窗继续向后移动。因此,当发生区内故障时,保护动作速度最快可以达到 5 ms。即使保护未能在 5 ms 动作,由于本文所提方案减小了制动系数,相比于传统的差动保护,也能够提高保护的動作速度。

4 仿真分析

在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的 220 kV 仿真模型,线路参数为 $Z_1 = 0.035 + j0.42 \Omega/\text{km}$ 、 $Z_0 = 0.3 + j1.04 \Omega/\text{km}$,设置线路长度为 70 km,2 个负荷均为 $40 + j20 \text{ MW}$ 。电流互感器采用 JA 模型。设置电流采样率为 10 kHz,即每周期 200 个采样点。设传统的相量和差比率制动判据为:

$$|I_M + I_N| > K |I_M - I_N| + I_{op0} \quad (9)$$

其中, K 为制动系数,为避免电容电流、互感器测量误差等影响,通常取为 0.3~0.7,本文仿真中取为 0.5。最小动作电流门槛值 I_{op0} 均取为 0.2 kA。下面通过几组典型的仿真算例对传统及基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案进行对比,以验证本文所提方案的优越性。

4.1 区内故障仿真

在 $t=1$ s 时设置区内 F_2 处发生 A 相金属性接地故障,故障前后 I_M 、 $-I_N$ 的波形如图 7 所示。

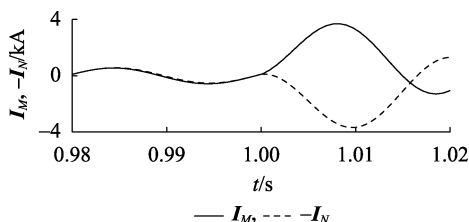


图 7 发生区内故障时的电流波形

Fig.7 Current waveforms under internal fault

取故障发生后 5 ms 数据,计算 $H(I_M, -I_N)$, 此时依据式(7)可计算得到 $f(H(I_M, -I_N)) = 0.15$, 则自适应差动判据与传统相量和差类差动判据的动作特性曲线如图 8 所示。

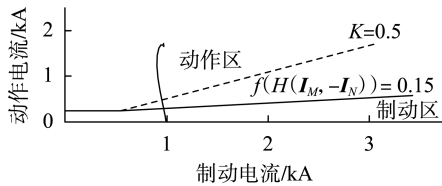


图 8 自适应差动保护方案动作特性示意图

Fig.8 Operating characteristics diagram of self-adaptive differential protection scheme

由图 8 可知,对于本文所提自适应差动判据,故障后 5 ms 动作电流即可迅速进入动作区;而对于传统相量和差类差动判据,动作电流也可在故障后 6 ms 进入动作区。可见,对于区内金属性接地故障的情况,传统差动保护方案与基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案均能保证保护快速可靠动作,且本文所提方案动作速度更快。

当发生 A 相经 150 Ω 过渡电阻接地故障时,取故障发生后 5 ms 数据计算 $H(I_M, -I_N)$, 此时依据式(7)可计算得到 $f(H(I_M, -I_N)) = 0.24$, 则自适应差动判据与传统相量和差类差动判据的动作特性曲线如图 9 所示。

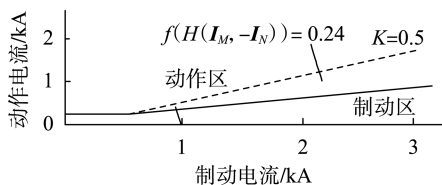


图 9 自适应差动保护方案动作特性示意图

Fig.9 Operating characteristics diagram of self-adaptive differential protection scheme

由图 9 可知,在发生高阻接地故障的情况下,本文所提自适应差动判据能够在故障后 15 ms 进入动作区;而传统的相量和差类差动判据由于灵敏度不足,动作电流无法进入动作区,保护未能正确动作。可见,由于本文所提基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案调整了制动系数,增大了动作区,使得在发生区内高阻接地故障的情况下,保护仍能可靠动作,相较于传统的差动保护方案优势明显。

4.2 区外故障仿真

在 $t=1$ s 时设置区外 F_1 处发生 A 相金属性接地故障,同时 N 侧 CT 发生严重饱和。故障前后 I_M 、 $-I_N$ 电流波形如图 10 所示。

由图 10 知,故障发生后 4 ms, N 侧 CT 即进入饱和状态。取故障发生后 5 ms 数据计算 $H(I_M, -I_N)$, 依据式(7)计算制动系数 $f(H(I_M, -I_N)) = 0.96$, 则自适应差动判据与传统相量和差类差动判据的动作

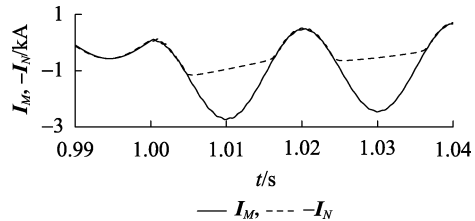


图 10 区外故障电流波形图

Fig.10 Current waveforms under external fault

特性曲线如图 11 所示。

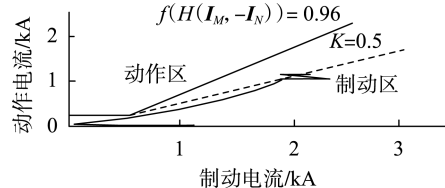


图 11 自适应差动保护方案动作特性示意图

Fig.11 Operating characteristics diagram of self-adaptive differential protection scheme

由图 11 可知,在发生区外故障伴随某侧 CT 饱和和场景下,对于传统的相量和差类差动保护,动作电流将穿越动作边界,导致保护误动;而本文所提基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案增大了制动系数,扩大了保护制动区域,从而保证保护可靠不动作。

另外,本节还在不同故障类型、故障初始角的条件下,对本文所提基于 Hausdorff 距离算法的自适应差动保护方案的带过渡电阻能力及抗 CT 饱和能力进行多次仿真测试,仿真结果均验证了本判据在区内高阻接地故障的场景下保持较高的动作灵敏性,并且还能够在 CT 极端严重饱和的场景下保证保护可靠不动作。除此之外,由于本文所提方法采用了固定数据窗,即只计算故障发生后 5 ms 的 Hausdorff 距离,对于转换性故障,无法单纯通过调节判据的制动系数加以应对。因此,参照传统电流差动保护应对转换性故障的方案,本文所提自适应差动保护应当在故障发生 5 个周期后,重新计算两侧电流的 Hausdorff 距离计算值,并相应调整制动系数,以应对转换性故障的情况。这种做法可能会牺牲一定的转换性故障保护动作速度,但是与传统的差动保护相比,性能并没有下降,同时还能够保证所提方案具备不受 CT 饱和和影响的优点。由于篇幅限制,具体仿真结果不再罗列。

需要指出的是,在弱馈侧发生区内故障的情况下,由于弱馈侧短路电流非常小,该侧无法发出保护启动信号,最终导致差动保护的拒动^[15]。针对该问题,可沿用现有的弱馈保护逻辑,在弱馈侧设置低压辅助启动元件,该元件能够在收到非弱馈侧差动保护动作的信号且差流元件动作时启动,当非弱馈侧的保护收到该启动信号后,就会驱动电流差动保护

动作切除故障^[16]。投入弱馈保护后,即可保证发生区内故障时不会出现保护拒动的情况,即使在弱馈系统发生区内高阻接地故障的场景下,依据本文所提自适应的制动系数调节方案,差动保护也能够正确动作。

5 结论

本文基于 Hausdorff 距离算法,提出一种自适应差动保护方案。该方案仅利用故障后 5 ms 数据,基于 Hausdorff 短窗算法计算线路两侧波形最大不匹配程度,从而动态调整制动系数,在发生区内故障时增大动作区以提高灵敏度,在发生区外故障时增大制动区以提高保护的安全性,具有良好的带过渡电阻及抗 CT 饱和能力。所提方案作为对传统电流差动保护的改进,能够同时兼顾保护的速动性、灵敏性及安全性,同时无需保护整定,原理简单,并且可进一步考虑将其应用于母线、变压器差动保护中。

参考文献:

- [1] 宋璇坤,申洪明,黄少锋,等. 特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):169-172,192.
SONG Xuankun, SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 169-172, 192.
- [2] 邓翔天,袁荣湘,肖振锋,等. 基于瞬时功率理论的输电线路分相电流差动保护[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):82-88,94.
DENG Xiangtian, YUAN Rongxiang, XIAO Zhenfeng, et al. Split-phase differential current protection based on instantaneous power theory for power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 82-88, 94.
- [3] 文明浩,陈德树. 小矢量算法浅析[J]. 电力系统自动化,2003,27(3):42-44.
WEN Minghao, CHEN Deshu. Simple analysis of phaselet algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 42-44.
- [4] 袁荣湘,陈德树,马天皓,等. 基于相关分析的暂态电流差动保护的原理与性能研究[J]. 电网技术,2000,24(4):40-42.
YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, MA Tianhao, et al. Study on transient current differential protection based on correlation analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 40-42.
- [5] 张方军,张伟中. 采样值电流差动保护一种新动作判据的研究分析[J]. 继电器,2006,34(18):12-14.
ZHANG Fangjun, ZHANG Weizhong. Analysis of a new action criterion for current sample value differential protection[J]. Relay, 2006, 34(18): 12-14.
- [6] 李斌,曾红艳,范瑞卿,等. 基于故障分量的相位相关电流差动保护[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):54-58.
LI Bin, ZENG Hongyan, FAN Ruiqing, et al. Phase correlation current differential protection based on fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 54-58.
- [7] 汤俊,王晓茹. 反应重负荷下高阻故障的稳态量线路差动保护判据[J]. 中国电机工程学报,2008,28(4):72-77.
TANG Jun, WANG Xiaoru. Current differential protection criterion using steady currents for heavy-load line with high fault resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 72-77.
- [8] 李丽,都洪基,刘林兴,等. 计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力自动化设备,2003,23(7):69-72.
LI Li, DU Hongji, LIU Linxing, et al. Research on confirming CT's saturation in busbar protection by calculating harmonic ratio[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 69-72.
- [9] 李贵存,刘万顺,贾清泉,等. 利用小波原理检测 TA 饱和的新方法[J]. 电力系统自动化,2001,25(5):36-39.
LI Guicun, LIU Wanshun, JIA Qingquan, et al. A novel method to identify TA saturation using wavelet principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 36-39.
- [10] 乾维江. 波形相关系数法的电流互感器饱和检测[J]. 广东输电与变电技术,2009,11(6):21-24.
QIAN Weijiang. CT saturation detection method based on mutuality coefficient[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009, 11(6): 21-24.
- [11] 舒丽霞,周成平,彭晓明,等. 基于 Hausdorff 距离图像配准方法研究[J]. 中国图象图形学报,2003,8(12):1412-1417.
SHU Lixia, ZHOU Chengping, PENG Xiaoming, et al. Image registration based on Hausdorff distance[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(12): 1412-1417.
- [12] 翁汉珩,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.
- [13] 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.
- [14] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2016:136-139.
- [15] 倪蜡琴,胡宏,刘虎林. 500 kV 线路保护弱馈问题的分析与探讨[J]. 华东电力,2008,36(6):50-52.
NI Laqin, HU Hong, LIU Hulin. Analysis of weak-infeed problems for 500 kV line protections[J]. East China Electric Power, 2008, 36(6): 50-52.
- [16] 周美娣. 浅论输电线路电流纵联差动保护的优缺点及存在问题的解决方法[J]. 科技世界,2013(21):156-157.
ZHOU Meiti. Advantages and disadvantages of current differential protection for transmission line and the solutions to existing problems[J]. Science and Technology Vision, 2013(21): 156-157.

作者简介:



李一泉

李一泉(1979—),男,江苏泰州人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护相关研究和管理(E-mail:1282520@qq.com);

吴梓亮(1989—),男,广东电白人,工程师,硕士,主要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)。

(下转第187页 continued on page 187)

Early thermal fault warning strategy of high voltage switch cabinet and its application

HUANG Xinbo¹, XUE Zhipeng¹, TIAN Yi¹, JIANG Botao¹, CHEN Li²

(1. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Xiangteng Microelectronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: Based on the time-domain diversity of thermal faults of high voltage switch cabinet, an improved combined weight similarity day method is proposed for long-term failure prediction, while an improved equivalent resistance model is established for real-time fault prediction. The improved combined weight similarity day method adopts the entropy weight method and order relationship analysis method to complete the calculation of similar days and the allocation of weight coefficients, which avoids the irrationality problem of similar day calculation and effectively improves the prediction accuracy. The improved equivalent resistance model is embedded with the dynamic threshold algorithm and spatial correlation analysis method to deal with the singularity data processing and feature extraction, which makes the fault signal analysis more accurate. The experimental results show that the proposed method and model can effectively predict the overall trend of faulty development in the early stage of current carrying faults with high accuracy.

Key words: high voltage switch cabinet; thermal fault; spatial correlation analysis method; entropy weight method; similar day; equivalent resistance

(上接第 180 页 continued from page 180)

Self-adaptive differential protection scheme for transmission line based on Hausdorff distance algorithm

LI Yiquan¹, WU Ziliang¹, WANG Feng¹, ZENG Genghui¹, CHEN Zhiguang¹, LUO Yuesheng¹, ZHU Xiaotong²

(1. Key Laboratory for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid,

Controlling and Dispatching Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China;

2. NR Engineering Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to improve the speed, sensitivity and security of the traditional current differential protection at the same time, a self-adaptive line differential protection scheme based on Hausdorff distance algorithm is proposed. The Hausdorff distance algorithm is utilized to calculate the current on both sides of the transmission line in real time and short window. On this basis, the restraint coefficient of differential protection is regulated to enhance the tolerance capability of fault resistance and the current transformer saturation, which has the advantages of self-adaption and free-setting. The simulation tests based on PSCAD verify the feasibility and superiority of the proposed scheme.

Key words: self-adaption; differential protection; relay protection; Hausdorff distance; high-resistance fault; current transformer saturation; free-setting