

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201200

换相失败对换流变差动保护影响分析及对策研究

翁汉琍¹, 武文昊¹, 王胜², 李振兴¹, 黄景光¹

(1. 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;
2. 江西省电力有限公司九江供电分公司, 江西 九江 332000)

摘要: 分析了换相失败造成换流变饱和的机理, 针对故障恢复期间发生换相失败时换流变差动电流与故障电流特征, 研究了故障恢复期间发生换相失败与故障差流共同作用时换流变的动作性能。研究表明, 在故障恢复期间, 换相失败对恢复性涌流具有助增作用。此时换流变若发生较轻微的区内故障, 差动保护存在延时动作的风险, 其速动性无法得到保证。最后, 提出了一种基于离散 Fréchet 距离的保护方案, 并通过仿真对该方案进行了验证。结果显示, 在故障恢复期间发生换相失败与故障共同作用时, 区外故障能有效闭锁, 区内故障能快速进行识别, 使差动保护正确动作。

关键词: 换流变压器; 差动保护; 二次谐波制动判据; 换相失败; 离散 Fréchet 距离

Influence of commutation failure on differential protection of converter transformers and its countermeasures

WENG Hanli¹, WU Wenhao¹, WANG Sheng², LI Zhenxing¹, HUANG Jingguang¹

(1. Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. Jiujiang Power Supply Branch of Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Jiujiang 332000, China)

Abstract: The saturation mechanism of converter transformer caused by commutation failures of converters is analyzed first. Aiming at the characteristics of differential current and fault current of converter transformer during commutation failures under fault recovery, the performance of converter transformer differential protection when it is simultaneously affected by both commutation failures and fault differential current during the fault recovery is studied. It is revealed that, during the fault recovery, the commutation failure has a facilitating effect on the recovery inrush. Under this situation, when minor internal faults occur, the differential protection has the risk of delayed operation, and its rapidity is unable to be guaranteed. Finally, a protection scheme based on discrete Fréchet distance is proposed and its performance is evaluated by simulation tests. The results indicate that when commutation failures and faults simultaneously occur during fault recovery, the proposed scheme can effectively block the protection under an external fault, and rapidly identify an internal fault so as to trip the differential protection correctly.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China "Analysis of Major Risk Caused by the Reclosure of Large-scale Power Transmission Channel and Study on Avoidance Control Strategy (No. 52077120).

Key words: converter transformer; differential protection; secondary harmonic restraint; commutation failure; discrete Fréchet distance

0 引言

近年来,随着我国各项直流工程的进一步扩建,交直流联合运行的混合电网正处于逐步形成之中^[1]。一方面高压直流输电(HVDC)以其良好的经济性、优

良的互联性以及高速的控制性等优点^[2-3]在我国的输电建设中迅速取得了一席之地;另一方面,由于其结构复杂,设备众多,也对继电保护提出了更高的要求。作为 HVDC 中常见的故障^[4],换相失败的发生会影响系统的性能以及各类继电保护的动作为。

针对换相失败的问题,国内外学者对其产生机理、影响因素进行了较深层次的研究^[5],并提出了

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“大规模电力外送通道重合闸所致重大风险分析与规避控制策略研究”(52077120)

各种检测及抑制方法^[6-8]。在换相失败影响继电保护的动作用性能研究方面,则主要集中于距离保护、纵联方向保护等线路保护方面^[9-11],而对于换流变压器(以下简称换流变)继电保护的影响分析相对较少。

对于直流输电系统而言,换流变常采用 12 脉动接线方式,且 12 脉动中包含的两台换流变一般同时投退,因此差动保护既包含 12 脉动的大差保护,也包含各换流变单独的小差保护,且往往亦配置二次谐波制动判据^[12]。

前人通过分析发现,在直流输电系统中,逆变侧较整流侧更易发生换相失败,且往往是由于交流系统故障引起,发生于故障期间及恢复过程之中。一般而言,在经过几次换相失败后系统即可自行恢复至正常换相状态,但在换相失败期间,作为交直流系统连接设备的换流变,其所配置的保护应能保证可靠性。但经过分析发现,在换相失败期间往往伴随非周期分量的产生,容易造成换流变饱和,导致换流变所配置保护存在误动或拒动风险。

理论上,在外部故障切除后系统即能正常运行,但实际现场中也不乏故障点转移的情况。因此,虽然在外部故障切除的恢复期间发生换相失败并伴随变压器再发生故障的概率较小,但随着交直流系统的进一步接入,系统复杂程度大大提升,其发生的概率也会相应增大。

本文首先分析了换相失败造成换流变饱和的机理及故障恢复期间发生换相失败时对恢复性涌流的助增作用,进而对故障恢复期间发生换相失败时的差流波形进行分析,结合不同故障情况,分析故障恢复期间同时发生故障与换相失败时的变压器差动保护特性。分析结果表明,在该类情况下,大差保护与小差保护均由于二次谐波制动的存在,使得保护存在延时动作的风险。为此,结合波形相似度的方法提出了一种解决方案,并通过仿真验证了该方案的可行性。

1 故障恢复期间换相失败对差流波形影响分析

在直流输电系统中,逆变侧换相失败常伴随于交流系统故障和故障切除而发生。故障期间直流功率传输中断,在故障切除后逐渐恢复。但在交流系统无功不足的情况下,故障恢复期间容易发生后续换相失败,而此期间经过的换相失败次数与交流侧无功支持的多少有关,即与短路比有关^[13]。

为此本文采用 CIGRE 的标准 HVDC 模型进行

分析,其中换流变参数见表 1。

表 1 换流变参数

Table 1 Converter transformer parameters	
参数	大小
容量/MVA	591.79
变比	230/209
频率/Hz	50
漏抗/p.u.	0.18
铜耗	0

图 1 为 $SCR=2.5$, $t=1$ s 时逆变侧交流系统发生三相短路故障,0.1 s 后故障切除时熄弧角大小、Y/d 换流变 A 相励磁电流变化曲线及磁链变化曲线。

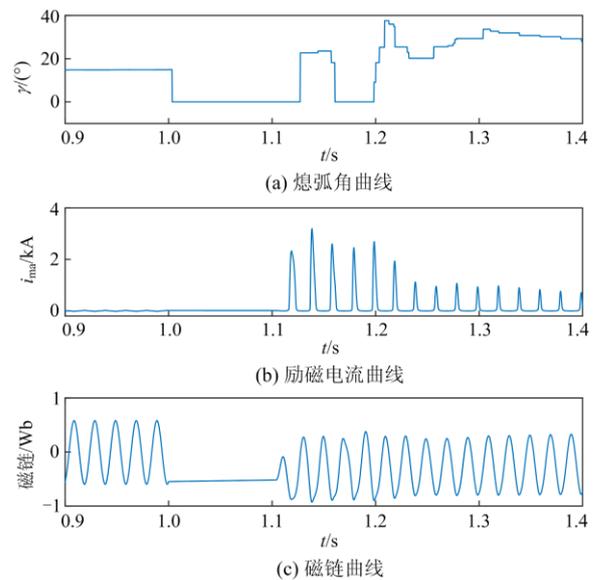


图 1 熄弧角及 Y/d 换流变励磁电流及磁链曲线

Fig. 1 Extinction angle and the excitation current and flux linkage curve of Y/d converter transformer

由图可知,在故障恢复期间,熄弧角 γ 在一段时间内是低于 10° 的最小熄弧角,此时发生了换相失败;此外,正如文献^[14-15]所述,由于换相失败期间会产生大量非周期分量侵入换流变,导致换流变磁链发生偏移,进而导致换流变发生饱和。

1.1 换相失败导致换流变饱和机理

对于图 2 所示的 6 脉动换流器示意图,换流阀导通顺序为: $V_4, V_5 \rightarrow V_5, V_6 \rightarrow V_6, V_1 \rightarrow V_1, V_2 \rightarrow V_2, V_3 \rightarrow V_3, V_4 \rightarrow V_4, V_5$ 。规定电流流入交流系统方向为正方向。

根据调制理论,换流器交流侧电流可看作换流器对直流侧电流的调制,其表达式为^[16]

$$i_\varphi = i_{dc} \times s_{i\varphi} \quad (1)$$

式中: φ 为 A、B、C 所对应的相; i_φ 为流入交流系

统的电流; i_{dc} 为直流侧电流; $s_{i\phi}$ 为各相所对应的电流开关函数。

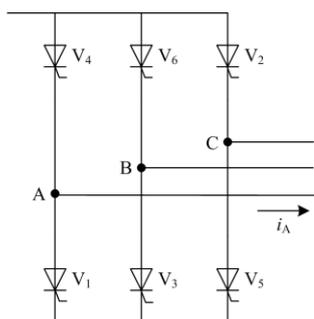


图 2 6脉动换流器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 6-pulse converter

由卷积定理可求得式(1)的动态向量表达式, 即

$$\dot{i}_{\phi(k)} = \sum_m \dot{i}_{dc(k-m)} \dot{S}_{i\phi(m)} \quad (2)$$

式中, k 与 m 为动态向量的阶数。

以 $V_4 \rightarrow V_6$ 发生换相失败时 A 相电流开关函数为例进行分析, 在不考虑换相失败对换相角 μ 影响的情况下, 图 3 分别给出了正常状态下的开关函数、换相失败后的开关函数以及换相失败后相对于正常情况所需叠加的开关函数。

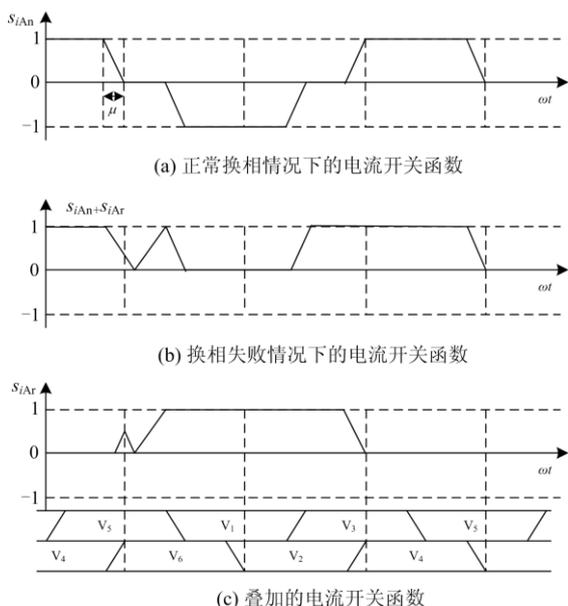


图 3 电流开关函数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of current switching function

则由式(1)、式(2)可得, 发生换相失败后流入交流系统的电流为

$$i_A = \left(i_{dcn} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dc(k)} \right) \times (s_{iAn} + s_{iAr}) \quad (3)$$

式中: i_{dcn} 为正常时的直流电流; $i_{dc(k)}$ 为发生换相失败时直流电流中所含的谐波分量; k 为谐波次数; s_{iAn} 为正常时的电流开关函数; s_{iAr} 为叠加的电流开关函数。

展开式(3)可得:

$$i_A = i_{dcn} s_{iAn} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dc(k)} s_{iAn} + i_{dcn} s_{iAr} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dc(k)} s_{iAr} \quad (4)$$

由该式可知, 交流系统电流受到直流电流谐波分量以及叠加的电流开关函数的影响, 而由图 3(c)可知, s_{iAr} 经傅里叶变换后必将含有较多的直流分量及谐波分量。即换相失败期间存在较多直流分量与非周期分量侵入交流系统, 而其含量则取决于 $i_{dc(k)}$ 与 s_{iAr} 中各分量的大小。另外需要指出的是在发生换相失败期间换相角 μ 也会相应发生变化, 但仅影响电流开关函数中换相期间的斜率及时长, 对于其所含直流分量与非周期分量的影响较小。

由前面分析可知, 换相失败期间流入交流系统的电流中直流分量及非周期分量与 $i_{dc(k)}$ 和 s_{iAr} 相关, 其中必然包含直流分量与非周期分量, 在其侵入换流变时, 会导致铁芯磁通发生偏移, 进入饱和区, 影响传变特性, 使得励磁电流发生畸变。

1.2 换相失败对恢复性涌流的影响

恢复性涌流时常发生在交流系统外部故障切除后的电压恢复过程中, 其幅值的大小与换流变铁芯的饱和程度相关, 而铁芯饱和程度又随直流分量的增多而加深, 由前文分析可知, 发生换相失败时会向交流系统中侵入直流分量等非周期分量。故在故障恢复期间发生换相失败时, 一方面存在恢复性涌流, 另一方面换相失败期间侵入的直流分量会进一步造成磁链的偏移, 使得铁芯饱和程度加深, 相应地, 涌流幅值将增大, 即换相失败会对恢复性涌流幅值大小有助增作用, 从而给保护带来更不利影响。

在交流系统无功不足的情况下, 故障恢复期间容易发生后续换相失败, 而短路比作为衡量交流系统强度的量, 其大小决定无功支持的多少。

对于直流系统而言, SCR 越小, 交流母线短路容量越小, 在发生故障时, 由交流系统提供的故障相短路电流亦更小; 另外在不同 SCR 情况下直流系统提供的故障相短路电流相差不大, 在工程计算中一般可忽略^[7]。而在外部故障恢复期间, 涌流初始幅值与故障严重程度相关, 故障越严重, 初始涌流幅值越大, 对于相同故障而言, SCR 越小, 故障电流越小, 亦即故障严重程度越低。为此本文分别选取 $SCR=2.0$ 、 2.5 、 12.4 三种不同短路比的情况进行分析。

在三种情况下, $t=1$ s 时交流母线发生单相接地故障, 0.1 s 后故障切除时, 熄弧角曲线、Y/d 换流变差流波形及有效值如图 4 所示。

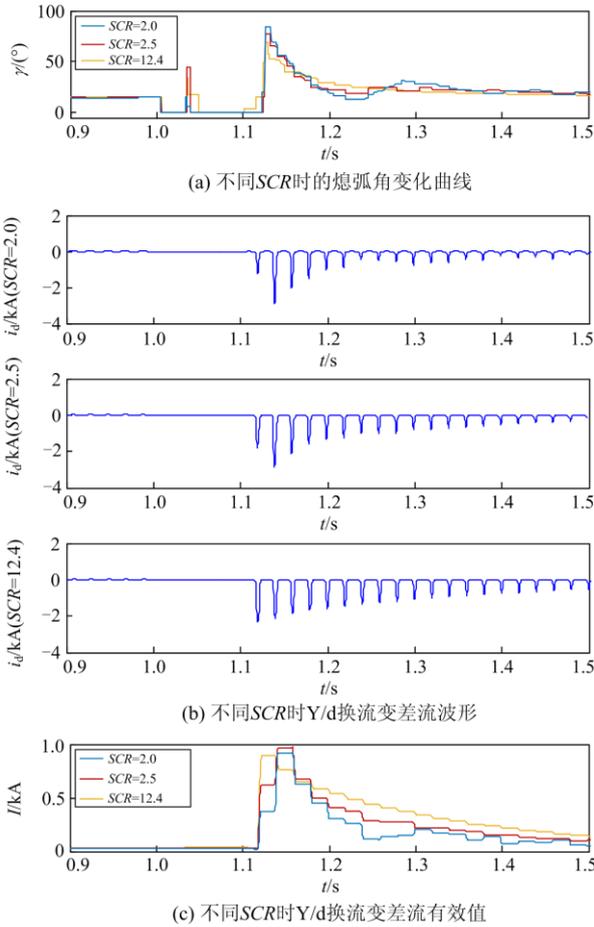


图 4 熄弧角及 Y/d 换流变差流

Fig. 4 Extinction angle and differential currents of Y/d converter transformer

如图 4(b)、图 4(c)可知, 在三种短路比情况下, 故障恢复初期, SCR 较小的短路电流也小, 又由图 4(a)可知, 在故障恢复期间均未再次发生换相失败, 但 SCR 较小的情况熄弧角波动较大, 恢复较慢, 在直流控制系统的作用下交直流电流均会随之发生变化, 使得后续差流有效值增大。

在三种情况下, $t=1$ s 时交流母线发生三相短路故障, 0.1 s 后故障切除时, 熄弧角曲线、Y/d 换流变差流波形及有效值如图 5 所示。

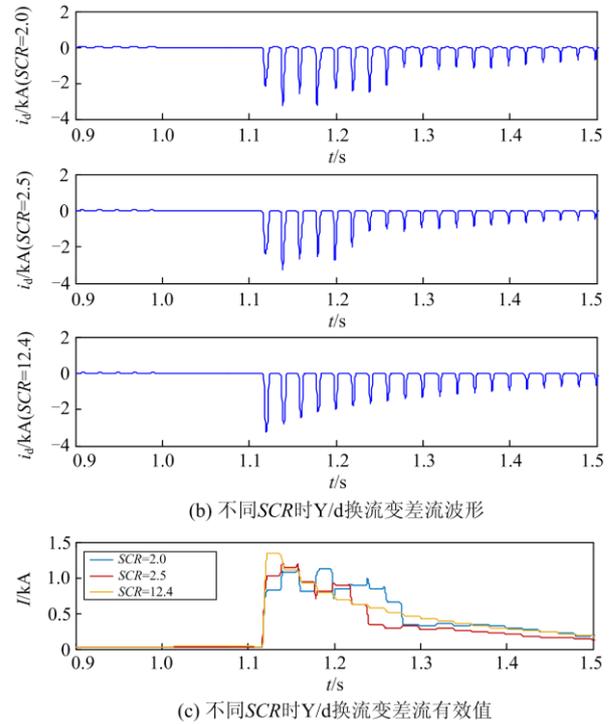
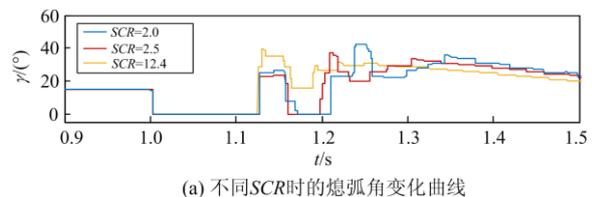


图 5 熄弧角及 Y/d 换流变差流

Fig. 5 Extinction angle and differential currents of Y/d converter transformer

同样, 在三种短路比情况下, 故障恢复初期, SCR 较小的短路电流也较小, 但在发生三相短路故障后, SCR 较小的情况在故障恢复期间再次发生了换相失败, 使得后续部分阶段 SCR 小的短路电流反而较 SCR 大的(未再次发生换相失败)差流有效值更大。

对比三种短路比情况下差动电流的有效值可知, 在未发生换相失败时($SCR=12.4$), 其有效值逐渐衰减; 在此过程中, 若发生换相失败($SCR=2.5$ 、 2.0), 产生的非周期分量侵入换流变时, 铁芯饱和程度加深, 因此, 有效值存在突然增大的过程, 即相对于正常情况的恢复性涌流而言, 换相失败对涌流幅值具有助增作用。对于故障程度相当的情况, 涌流衰减至同样的低幅值, 受到换相失败影响时所需时间将更长。

2 换相失败对换流变差动保护的影响

上述分析可知, 在故障恢复期间常会产生恢复性涌流, 且直流功率的恢复也常需经几次换相失败, 流入换流变的非周期分量容易加剧换流变铁芯的饱和状况, 其助增作用会使得涌流幅值提高。但因其仍保持涌流特征, 二次谐波含量较高, 二次谐波制

动判据将会生效, 闭锁差动保护。但若在该情况下再次发生故障, 将可能影响换流变差动保护的动作情况。

当换流变仅发生区内故障时, 差流呈现高幅值的故障电流特征。若其发生于故障恢复伴随换相失败期间, 换流变差流将为故障电流与前文所述助增后涌流的叠加, 此时二次谐波制动判据可能受到影响, 使得换流变差动保护动作性能异常。因此, 本文重点讨论在故障恢复伴随换相失败期间, 换流变发生区内故障时其差动保护的動作特性。

为便于分析, 在 $SCR=2.5$ 时, 以 CIGRE 的标准 HVDC 模型为例, 对该情况进行仿真分析。逆变侧交流系统在 $t=1\text{ s}$ 时发生三相短路故障, 0.1 s 后故障恢复, 并伴随发生换相失败。

算例 1: $t=1.11\text{ s}$ 时 Y/d 换流变 Y 侧出口发生单相接地故障。此时换流变 A 相小差电流、大差电流及相应二次谐波含量如图 6 所示。

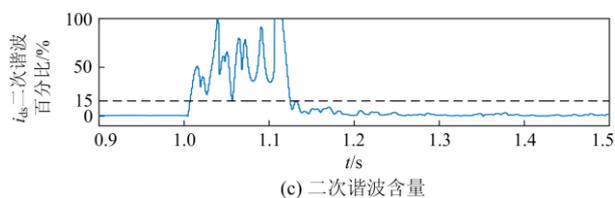
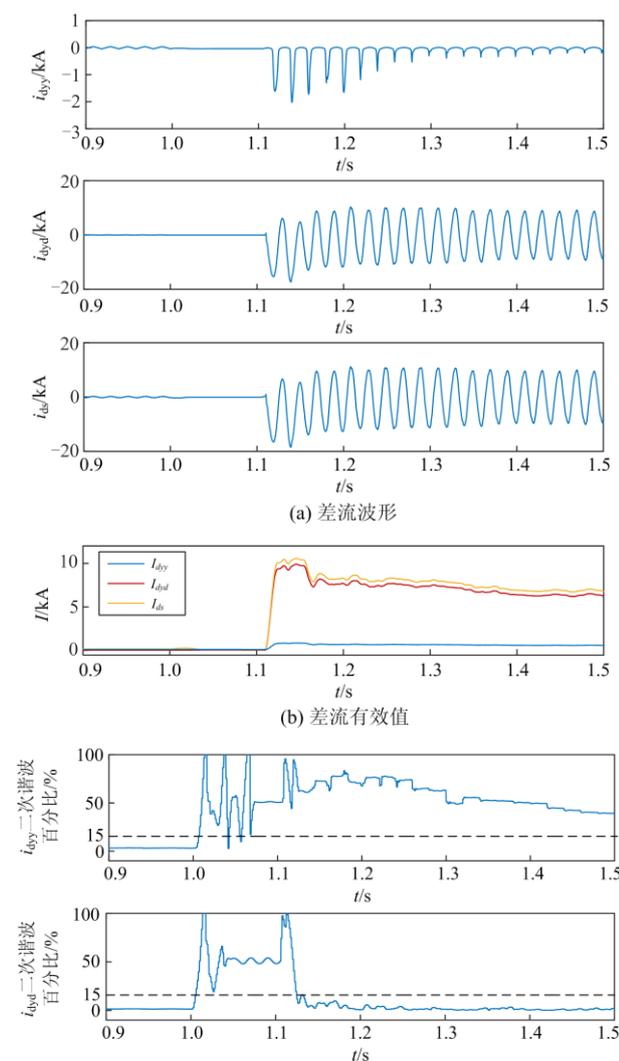


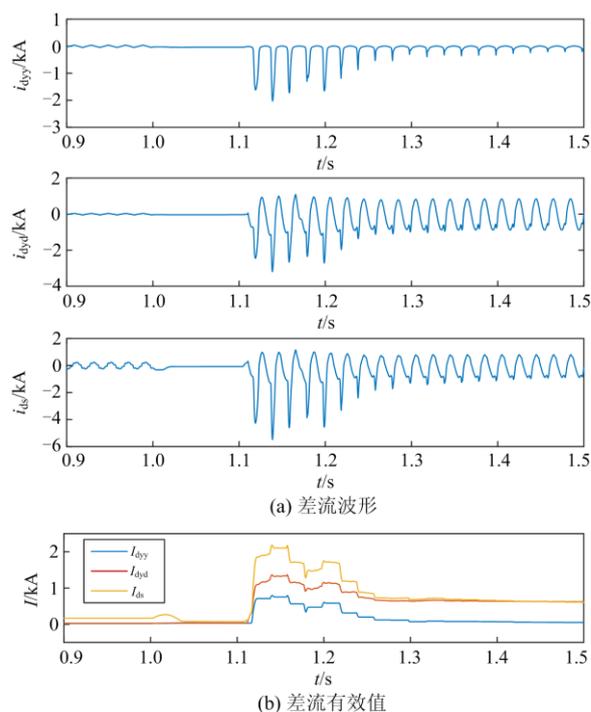
图 6 差动电流及二次谐波含量(算例 1)

Fig. 6 Differential current and second harmonic ratios to fundamental (Scenario 1)

由图 6 可知, 对于 Y/y 换流变而言, 此为区外故障, 差流幅值较小, 保护不动作; 对于 Y/d 换流变差动保护以及大差保护而言, 此为区内故障, 差流幅值较高, 且二次谐波含量快速低于 15%, 差动保护快速正确动作。

算例 2: $t=1.11\text{ s}$ 时 Y/d 换流变 Y 侧出口发生单相高阻接地故障, 接地电阻为 $200\ \Omega$ 。

由图 7 可知, 对于 Y/y 换流变而言, 该故障为区外故障, 其差流主要是故障切除后恢复性涌流, 二次谐波含量稳定高于 15%, 保护被可靠闭锁; 对于 Y/d 换流变而言, 由于高阻故障时, 故障电流与换相失败作用助增后的涌流幅值大小接近, 使得差流中二次谐波含量较高, 保护被闭锁至 1.360 s , 二次谐波含量才低于 15%, 保护延时动作; 大差保护动作行为与 Y/d 小差保护类似, 二次谐波含量在 1.420 s 时一直高于制动门槛, 导致大差保护动作延迟。



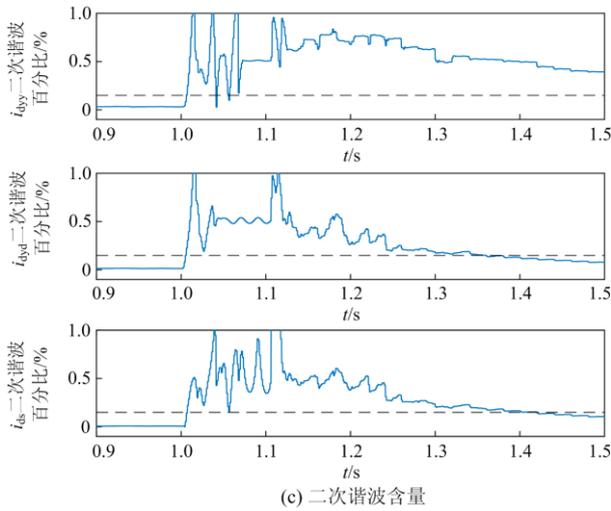


图 7 差动电流及二次谐波含量(算例 2)

Fig. 7 Differential current and second harmonic ratios to fundamental (Scenario 2)

表 2 为 Y/d 换流变 Y 侧出口在 $t=1.11$ s 时带不同接地电阻时发生单相接地故障时换流变小差保护与大差保护的動作情况。

表 2 不同接地电阻保护动作情况

Table 2 Protection action time of different grounding resistances

接地电阻/ Ω	Y/y 小差保护动作时间/s	Y/d 小差保护动作时间/s	大差保护动作时间/s
0	—	0.015	0.015
10	—	0.023	0.023
50	—	0.013	0.029
100	—	0.131	0.152
150	—	0.243	0.243
200	—	0.25	0.31

由算例 1、2 及表 2 可知，在换流变发生区内故障时，若故障程度较严重，差流幅值较大，保护能正确快速动作；但当故障程度较轻时，差流幅值与换相失败时涌流幅值相当，此时二次谐波制动判据将延迟开放换流变小差保护与大差保护，使得保护有延时动作风险。

算例 3：在 $SCR=2.5$ 及 $SCR=12.4$ 时，逆变侧交流系统在 $t=1$ s 时发生同等程度的三相短路故障，0.1 s 后故障被切除， $t=1.11$ s 时 Y/d 换流变 Y 侧出口发生单相高阻接地故障，接地电阻为 100Ω ，此时 Y/d 换流变差流及二次谐波含量如图 8 所示。

对比两种 SCR 值下的差动电流波形、有效值及二次谐波含量，可以发现在恢复性涌流期间若再发生区内高阻接地故障，无论外部故障恢复前期是否发生换相失败，故障电流均较涌流幅值低，差动电

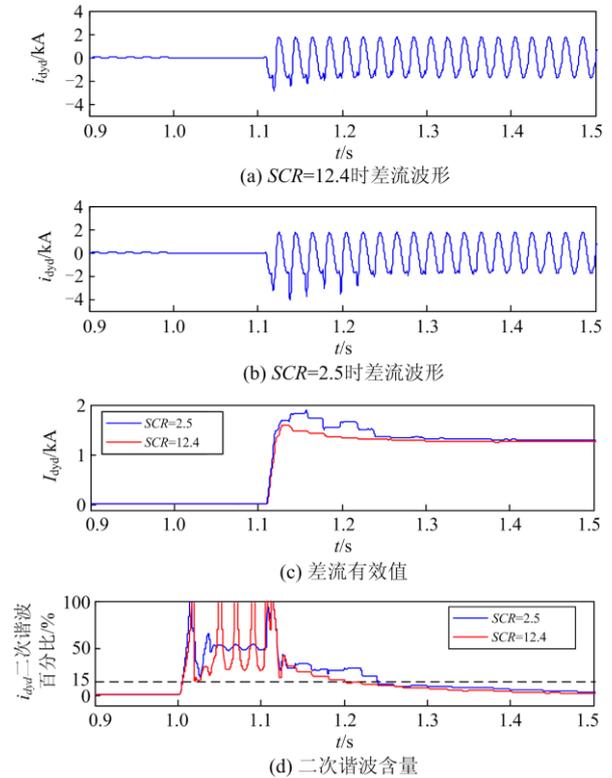


图 8 差动电流及二次谐波含量(算例 3)

Fig. 8 Differential current and second harmonic ratios to fundamental (Scenario 3)

流中二次谐波含量较高，保护暂时会被闭锁。随着涌流的衰减，若在恢复性涌流期间未发生换相失败，涌流幅值持续衰减，差动电流二次谐波含量在故障后 110 ms 时降低至 15% 以下，如图 8(c)、图(d)中红线所示(对应于 $SCR=12.4$)；若在恢复性涌流期间伴随有换相失败发生，则涌流在换相失败的助增作用下，其幅值会有不降反升的过程，延缓了涌流衰减速度，因此较之未发生换相失败时的情况，故障后差流有效值有所增大，二次谐波降低至 15% 的门槛值之下需要更长时间，如图 8(c)、8(d)中蓝线所示(对应于 $SCR=2.5$)，二次谐波含量在故障发生后 131 ms 才降低至 15% 以下，因此，相比较之下，此时保护动作比未发生换相失败时还将延迟 20 ms 左右。

3 保护延时动作解决方案

由上文内容可知，在故障恢复期间会产生恢复性涌流，但逐渐衰减，在此过程中若伴随换相失败，涌流幅值会突然增大，在该情况下，发生区内故障而二次谐波制动判据错误闭锁保护并使得保护延迟动作的风险增加。

由前面分析可知, 在外部故障恢复期间, 无论是否发生换相失败, 换流变差流均呈现涌流波形特征。图 9 为一周波涌流波形、故障差流波形以及涌流与故障差流共同作用时的一周波波形。

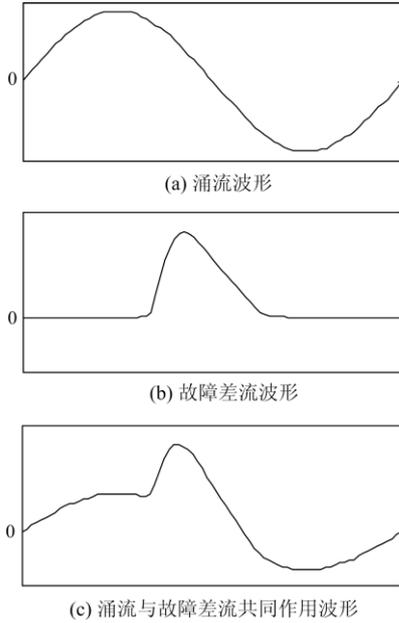


图 9 涌流及故障差流波形

Fig. 9 Waveform of inrush current and fault differential current

通过图 9(a)的涌流波形可以发现, 其包含尖顶波与间断角特征, 而对于图 9(b)中故障差流而言, 其波形呈现正弦波特征; 而在图 9(c)涌流与故障差流共同作用的情况下, 对于涌流的尖顶波区域, 差流波形受其影响可能发生畸变, 但对于涌流的间断角区域, 差流则仍然保持正弦波特征。因此可以通过不受涌流特征影响的半周(即间断角范围)对故障进行识别。

波形特征识别作为一种常用的方法, 已多次运用于电力系统的不同领域^[18-19], 本文利用波形相似度的方法对该情况进行识别。波形相似度中距离度量与相似度量度量为常用的两种度量函数。余弦相似度作为常用的相似度量, 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^[20]; 而作为距离度量的最远距离、最近距离、质心距离则受到空间目标的形状以及位置的影响^[21]。Fréchet 距离则是一种基于空间目标整体形状特征以及曲线中各点的位置和时间顺序且具有良好的抗数据丢失能力的距离度量函数, 其在电力系统中也得到了一定的应用^[22-25]。因此, 本文利用标准正弦波与归一化处理后差流序列之间的离散 Fréchet 距离进行判别。

3.1 离散 Fréchet 距离原理

Fréchet 距离起源于狗绳问题。假定有一人通过狗绳牵着一狗, 人、狗分别从曲线 A、B 的起点出发, 向终点走去, 人、狗均可自由改变速度, 但不允许回头, 则能通过这两条曲线的最短绳长即为 Fréchet 距离。

然而, 人们常用离散的点代表曲线, 因此, 通过对连续 Fréchet 距离的研究, Eiter 和 Mannila 又提出了离散 Fréchet 距离的定义^[26]。

对于两离散曲线 $A = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_m)$, $B = (b_1, \dots, b_j, \dots, b_n)$, 分别计算两曲线上各点间的欧氏距离并形成 $m \times n$ 阶距离矩阵, 记为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mj} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix}, (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

假设从 d_{11} 出发到达 d_{mn} 的路径有 p 条, 记为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_p\}$, 针对每条路径, 应遵循如下条件, 以其中一条路径 w_k 为例, 该路径下经过的距离值个数记为 s , 其集合记为 L_k , 即 $L_k = \{l_{k1}, l_{k2}, \dots, l_{kx}, \dots, l_{ks}\}$, 其中每个元素应满足以下条件:

$$\textcircled{1} l_{k1} = d_{11}, l_{ks} = d_{mn}$$

$$\textcircled{2} \text{若 } l_{k(x-1)} = d_{ij}, \text{ 则 } l_{kx} = \begin{cases} d_{i(j+1)} \\ d_{(i+1)j} \\ d_{(i+1)(j+1)} \end{cases} \quad (x=1,2,\dots,s)$$

即路径必须从 d_{11} 出发到达 d_{mn} , 且只能朝着距离矩阵的右方、下方或右下方前进。

则两离散曲线 A、B 之间的离散 Fréchet 距离值可表示为

$$F(A, B) = \min_{w_k \in W} \max_{l_{kx} \in L_k} (l_{kx}), (k=1,2,\dots,p; x=1,2,\dots,s) \quad (6)$$

图 10 为在不同数量采样点情况下离散 Fréchet 距离计算示意图。由图可知, 两曲线间的连续 Fréchet 距离为 a_2 与 O 之间的欧氏距离。对于采样点较少的情况, 如图 10(a)所示, 此时得到的离散 Fréchet 距离值为 a_2 与 b_2 间的欧氏距离, 而当采样值相对较多时, 如图 10(b)所示, 其离散 Fréchet 距离则变为 a_2 与 b 之间的欧氏距离, 但随着采样点的增多, 其离散 Fréchet 距离逐渐接近于连续 Fréchet 距离。因此, 当采样点足够多时, 离散 Fréchet 距离无限接近于连续 Fréchet 距离。

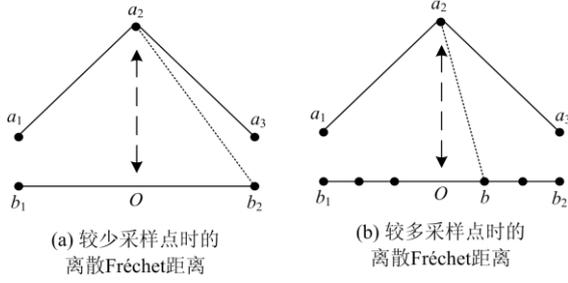


图 10 不同采样点数的离散 Fréchet 距离

Fig. 10 Discrete Fréchet distance of different sampling points

另外，离散 Fréchet 距离算法并不严格要求两条曲线的采样点数目相同。从这个意义上说，当采样量足够时，某些采样量的损失对离散 Fréchet 距离的计算和相似度识别影响不大。

现如今，在现场的保护中常采用微机技术，而微机装置的采样频率一般不会太低，且随着技术的发展，采样频率亦将逐渐增加。在采样频率增加的过程中，离散 Fréchet 距离将更接近于连续 Fréchet 距离，即算法更精确。

3.2 基于离散 Fréchet 距离的保护判据

离散 Fréchet 距离算法是利用离散的特征点进行相似度识别，而差流信号亦为二维平面中的点，通过构造与其匹配的对应正弦序列即可完成波形相似度的识别。

由于比较的是差流波形形态的特征，故考虑消除波形幅值的影响。因此在计算离散 Fréchet 距离值之前需对差流波形进行归一化，并形成相对应的正弦波。

为使其仅包含故障半周波形，从而减少换相失败产生的涌流的干扰，数据窗选取 1/4 周波进行计算。即当差流越限时，以 1/4 周期的数据窗对差流序列进行采集，并归一化至[-1,1]，同时同步生成相同采样率的标准正弦波，进而计算两离散序列的离散 Fréchet 距离值，记为 DF 。

其具体步骤为：

(1) 差流波形的归一化，以内部故障差流进行说明。图 11 为归一化过程，其中 SW 代表数据窗， p_e 指极值所对应采样点， p_z 为 p_e 前推 1/4 周期所对应的采样点， i_d 为采样点对应的电流值。

对于 SW_1 数据窗中的任意一点 k ，其所对应的电流值为 $i_d(k)$ ，其归一化的基准值为 $|i_d(p_{e1}) - i_d(p_{z1})|$ ，相对应的归一化计算为

$$i_{d\text{norm}}(k) = \frac{i_d(k) - i_d(p_{z1})}{|i_d(p_{e1}) - i_d(p_{z1})|}, k \in (p_{e1}, p_{z2}) \quad (7)$$

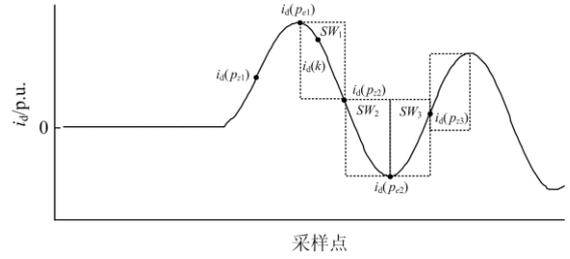


图 11 波形归一化示意图

Fig. 11 Schematic diagram of waveform normalization

而对于进入 SW_2 数据窗的电流，其归一化基准变为 $|i_d(p_{e1}) - i_d(p_{z2})|$ ，相对应的归一化计算为

$$i_{d\text{norm}}(k) = \frac{i_d(k) - i_d(p_{z2})}{|i_d(p_{e1}) - i_d(p_{z2})|}, k \in (p_{z2}, p_{e2}) \quad (8)$$

同理 SW_3 数据窗内电流的归一化方式为

$$i_{d\text{norm}}(k) = \frac{i_d(k) - i_d(p_{z2})}{|i_d(p_{e2}) - i_d(p_{z2})|}, k \in (p_{e2}, p_{z3}) \quad (9)$$

(2) 同步生成标准正弦波序列。在对差流进行归一化的过程中可以得到 p_e 与 p_z ，以此作为幅值为 1 的标准正弦波的极值点(极大值点或极小值点)与过零点，即可生成对应的标准正弦电流。对于 4 kHz 的采样频率，若 p_e 为极大值点，则生成的标准正弦电流为

$$i_{\sin}(k) = \sin\left(\frac{\pi}{40}k - \frac{p_e\pi}{40} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

若 p_e 为极小值点，则生成的标准正弦电流为

$$i_{\sin}(k) = -\sin\left(\frac{\pi}{40}k - \frac{p_e\pi}{40} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

归一化电流与标准化正弦波对比如图 12。

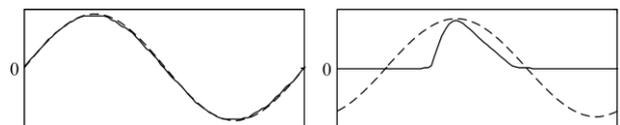


图 12 归一化电流与标准正弦波对比图

Fig. 12 Comparison of normalized current and standard sine wave

由于归一化序列与标准正弦波序列同步生成，因此， DF 值应保持在[0,1]。理论上，故障差流应保持正弦特性，归一化后与标准正弦波应完全重合，此时 DF 值为 0，但由于进行保护整定时不利用可靠系数的乘除，因此先求其补集进行可靠系数乘除后，再次求取补集作为动作门槛值。即

$$DF_{\text{set}} = 1 - (1 - DF_{\text{theory}}) / K_{\text{rel}} \quad (12)$$

式中： DF_{theory} 取理想故障情况值 0； K_{rel} 取 1.25。则

$$DF_{\text{set}} = 1 - (1 - 0) / 1.25 = 0.2。$$

另外需要指出的是, 对于差流未越限的情况, 保护不会启动, 此时赋其 DF 值为 1。

此外, 由于离散 Fréchet 距离在采样值足够时, 受部分采样点损失的影响较小, 因此在进行计算之前可通过去除异常数据以减少其干扰。

因此该保护判据实现的主要步骤为: 在差流幅值越限时启动, 通过 1/4 数据窗提取差流序列, 去除异常数据, 并进行归一化处理, 同时同步生成相同采样频率的标准正弦波序列, 进而计算两者间的 DF 值, 最后与 DF_{set} 进行比较, 若低于 0.2, 则保护动作, 否则保护闭锁。

3.3 仿真验证

算例 1, $SCR=2.5$, 逆变侧交流系统在 $t=1\text{ s}$ 时发生三相短路故障, 0.1 s 后故障被切除, 并伴随换相失败的发生。 $t=1.11\text{ s}$ 时 Y/d 换流变 Y 侧出口发生单相接地故障。此时换流变 A 相小差电流、大差电流利用所提算法求出的 DF 值序列如图 13 所示。

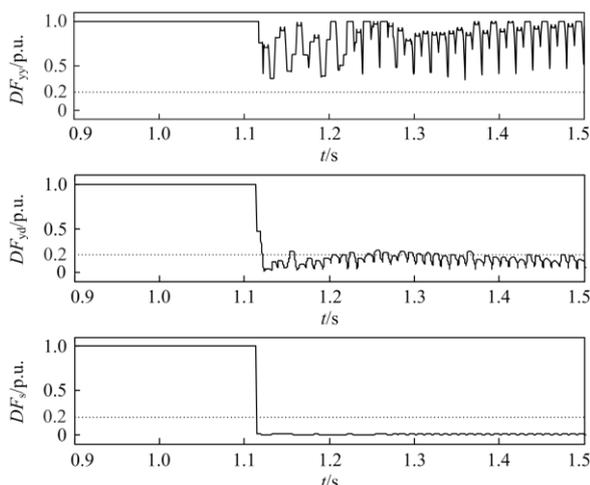


图 13 DF 值序列

Fig. 13 Value of DF for the proposed criterion

该故障对于 Y/y 换流变而言为区外故障, 差动电流波形主要呈现涌流特征, 与正弦波特征相差较大, 使得 DF 值能稳定的高于 0.2 的保护整定值, 此时差动保护有效闭锁, 不会发生误动行为; 对于 Y/d 换流变小差保护以及该组换流变大差保护而言, 该故障为区内故障, 此时差流波形呈现正弦波特征, DF 值分别在故障后 10 ms 和故障后 5 ms 低于 0.2 的保护整定值, 此时两保护均能在半周波内快速动作。

算例 2, 在 $t=1.11\text{ s}$ 时以 Y/d 换流变 Y 侧出口经 $200\ \Omega$ 接地电阻单相接地故障为例进行仿真验证, 利用所提算法求出的 DF 值序列如图 14。

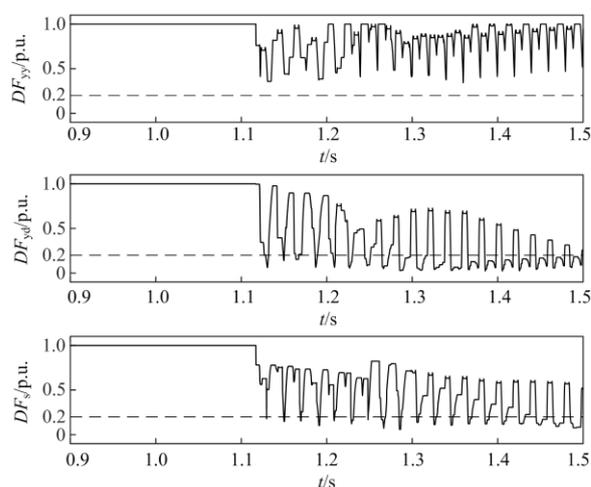


图 14 DF 值序列

Fig. 14 Value of DF for the proposed criterion

由 DF 值序列可知, 对于 Y/y 换流变而言的区外故障, 即使在换相失败导致的涌流的影响下, DF 值能稳定的高于 0.2 的保护整定值, 此时差动保护有效闭锁, 不会发生误动行为; 对于 Y/d 换流变差动保护以及大差保护而言, 该故障为区内故障, 此时 DF 值分别在故障后 18 ms 和故障后 19 ms 低于 0.2 的保护整定值, 此时两保护均在一个周波内快速动作。表 2 中其他过渡电阻动作情况见表 3。

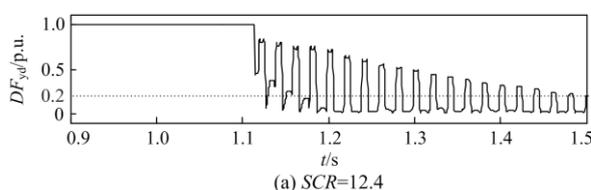
表 3 不同接地电阻保护动作情况

Table 3 Protection action time of different grounding resistances

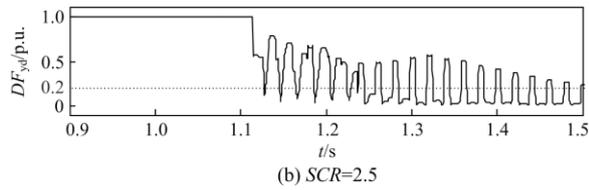
接地电阻/ Ω	Y/y 小差保护动作时间/s	Y/d 小差保护动作时间/s	大差保护动作时间/s
0	—	0.005	0.008
10	—	0.006	0.010
50	—	0.005	0.010
100	—	0.018	0.019
150	—	0.018	0.019

由表 3 可知, 在换流变发生区内故障时, 若故障程度较重, 差流幅值较大, 保护依旧能正确快速动作, 当故障程度较轻时, 差流幅值与换相失败时涌流幅值相当, 对于二次谐波制动判据导致换流变小差保护与大差保护延时动作的情况, 利用本文所提判据依旧能在一周波内快速动作。

算例 3, 在不同 SCR 情况下, Y/d 换流变差流利用所提算法求出的 DF 值序列见图 15。



(a) $SCR=12.4$

图 15 DF 值序列Fig. 15 Value of DF for the proposed criterion

在交流系统故障切除后的恢复期间, 无论是否伴随换相失败发生, 在此期间发生区内高阻故障时, 差流波形仅半波既包含涌流特征, 又包含正弦波特征, 而另外半波基本仅包含正弦波特征, 因此虽然二次谐波制动判据会使得保护延时动作(以及涌流幅值较低时换相失败导致的额外延时), 但由于正半波波形满足正弦波特征, 经离散 Fréchet 距离计算出的 DF 值较低, 能在故障差流的正弦波半波低于保护整定值, 如图 15 所示, DF 值分别在故障后 17 ms 和故障后 18 ms 低于 0.2 的保护整定值, 此时保护均能在一个周波内动作。

4 结论

本文重点研究了换流变小差及大差保护在换相失败期间的动作性能, 综合考虑了故障与换相失败共同作用对保护的影响。研究发现, 在故障恢复期间由于换相失败期间引入了非周期分量会导致换流变发生饱和, 使差流中产生类似涌流波形, 与恢复性涌流共同作用时, 若换流变发生故障, 差动保护将受到一定影响。对于换流变区外故障以及故障程度较强的区内故障而言, 保护依旧能够快速有效动作, 但对于较轻的区内故障而言, 二次谐波制动的存在会导致保护在一段时间内误闭锁, 保护延时动作, 影响保护的速动性。为此, 提出了一种基于离散 Fréchet 距离的故障识别方法, 该方法能保证换流变在发生区外故障时有效闭锁, 在发生区内故障时, 则能在一周波内快速识别, 从而使保护快速有效动作。

参考文献

- [1] 刘俊磊, 王钢, 李海锋, 等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118, 13.
LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 111-118, 13.
- [2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [4] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 266-271.
LI Xinnian, YI Jun, LI Boqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271.
- [5] 陈佳浩, 王琦, 朱鑫要, 等. 谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 196-202.
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 196-202.
- [6] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [7] 张国辉, 景柳铭, 王宾, 等. 谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 33-41.
ZHANG Guohui, JING Liuming, WANG Bin, et al. Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 33-41.
- [8] 孟乐强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.
MENG Qingqiang, LIU Zehong, HONG Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 119-127.
- [9] 黄少锋, 费彬, 申洪明, 等. 换相失败对距离保护的影响分析及防范措施的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 123-128.
HUANG Shaofeng, FEI Bin, SHEN Hongming, et al. Effect of commutation failure on distance protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 123-128.
- [10] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(二)直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 65-71.
LEI Hongyun, YU Zhanxun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection Part two: analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation

- failure on AC line protections[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(24): 65-71.
- [11] 刘之尧, 唐卓尧, 张文峰, 等. 直流换相失败引起继电保护误动分析[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(19): 104-107. LIU Zhiyao, TANG Zhuoyao, ZHANG Wenfeng, et al. Analysis of protective relaying mal-operation caused by commutation failure in HVDC[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(19): 104-107.
- [12] 翁汉琨, 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. 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.
- [13] 杨秀, 陈鸿煜. 高压直流输电系统换相失败的仿真研究[J]. *高电压技术*, 2008, 34(2): 247-250, 270. YANG Xiu, CHEN Hongyu. Simulation study of commutation failure of HVDC transmission system[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(2): 247-250, 270.
- [14] 申洪明, 宋璇坤, 韩柳. 直流换相失败对换流变零序电流保护的影响分析[J]. *变压器*, 2018, 55(2): 43-46. SHEN Hongming, SONG Xuankun, HAN Liu. Influence of commutation failure on zero-sequence current protection of converter transformer[J]. *Transformer*, 2018, 55(2): 43-46.
- [15] 黄少锋, 申洪明, 刘玮, 等. 交直流互联系统对换流变压器差动保护的影响分析及对策[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(23): 158-164. HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Wei, et al. Effect of AC/DC interconnected network on transformer protection and its countermeasures[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(23): 158-164.
- [16] HU L, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1992, 7(3): 514-525.
- [17] 王铁柱, 万磊, 张彦涛, 等. 交流侧单相短路时直流系统提供短路电流的特性分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(7): 1970-1977. WANG Tiezhu, WAN Lei, ZHANG Yantao, et al. A study of characteristic of short-circuit current contributed by DC systems with single-phase short-circuit fault on AC side[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(7): 1970-1977.
- [18] HAN Jiexiang, KONG Xiangping, LI Peng, et al. A novel low voltage ride through strategy for cascaded power electronic transformer[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(3): 227-238. DOI: 10.1186/s41601-019-0137-1.
- [19] HICHEM H, REGAYA C B, ZAAFOURI A. A sliding-neural network control of induction-motor-pump supplied by photovoltaic generator[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 306-322. DOI: 10.1186/s41601-019-0145-1.
- [20] 赵航, 林湘宁, 喻锴, 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, 7079. 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, 7079.
- [21] 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.
- [22] 陈超. 电力系统短期负荷预测研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014. CHEN Chao. Research on short term load forecasting of power system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [23] JIAO Dongsheng, WANG Haiyun. EV battery SOH diagnosis method based on discrete Fréchet distance[C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), November 26-29, 2015, Changsha, China: 2634-2639.
- [24] YAN Yuehao, ZHOU Xinrui, BAO Wei, et al. Connection identification of low voltage distribution areas based on distance measurement and trend similarity[C] // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), September 20-23, 2020, Nanjing, China: 1-5.
- [25] WENG Hanli, WANG Sheng, WAN Yi, et al. Discrete Fréchet distance algorithm based criterion of transformer differential protection with the immunity to saturation of current transformer[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 115.
- [26] EITER T, MANNILA H. Computing discrete Fréchet distance Tech Report CD-TR 94/64[R]. Vienna: Technical University of Vienna, 1994.

收稿日期: 2020-10-04; 修回日期: 2021-01-08

作者简介:

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

武文昊(1995—), 男, 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: 1009165978@qq.com

王胜(1996—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: 745232821@qq.com

(编辑 姜新丽)