

HVDC 换相失败暂态特性及其对差动保护的 影响分析和对策

申洪明, 黄少锋, 费 彬

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 通过 CIGRE HVDC 标准测试模型, 获取了直流系统换相失败时的等值工频电流与换流母线电压之间的关系曲线。推导了交直流互联系统中电流差动保护的判据表达式, 并对与直流系统直接相连的输电线路的差动保护进行了分析。分析结果表明, 交直流互联运行环境下发生区内故障有可能引发差动保护的拒动。提出了基于幅值判据来识别内部故障。PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了理论分析的正确性和所提判据的有效性。

关键词: 高压直流输电; 换相失败; 暂态; 暂态特性; 等值工频电流; 差动保护; 继电保护; 幅值判据

中图分类号: TM 72; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.016

0 引言

换相失败是高压直流输电系统的常见故障之一, 大多数情况下是由逆变侧交流系统故障引发的。交流侧发生故障引起换相失败时, 在保护控制的协同作用下直流系统快速调整并恢复至正常运行状态^[1-2]。在此暂态过程中, 直流系统的等值交流电流、阻抗、功率等电气量均会发生突变, 从而造成此时的交流系统暂态特征与纯交流系统大不相同^[2-4], 这必然会对现有交流电网继电保护的動作行为带来影响, 严重时将造成交流电网继电保护的不正确动作。同时现阶段主要开展了直流线路保护的研究^[5-7], 有关交直流互联系统对交流侧保护的影响分析不足。因此, 深入研究交直流互联系统对交流电网继电保护的影响具有重要意义。

文献[8]分析了直流系统等值电流作用于过电压电阻而造成测量电抗的变化, 从而对距离保护产生影响; 文献[9]对直流馈入运行环境下功率倒向引起的纵联方向保护误动进行了分析; 文献[10-12]通过建立直流系统等值工频变化量阻抗模型, 分析了直流换相失败对工频变化量方向保护动作特性的影响。上述研究成果同时表明, 为了分析直流馈入对交流侧继电保护的影响, 最关键的问题在于获取故障期间直流系统等值工频电流的暂态特性。

由于直流系统故障时呈现出的暂态特性很难用数学公式精确地得到其解析表达, 因此本文首先基于 CIGRE HVDC 标准测试模型, 给出了不同故障条

件下直流系统等值工频电流的变化规律; 在此基础上, 通过故障网络的分析推导了含直流扰动源时的故障分量电流差动保护表达式, 并分析其动作情况。由分析结果可知, 换相失败可能会引发差动保护的拒动, 并提出了一种仅基于幅值的判据, 新的判据能更好地识别区内故障。最后基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证了分析结果的正确性。

1 直流系统等值工频电流的变化特性

1.1 交直流互联系统数学模型

对于逆变侧受端交流网络而言, 直流系统可以等效成一个由逆变站交流侧母线电压控制的受控电流源^[9], 其等效电路如图 1 所示。

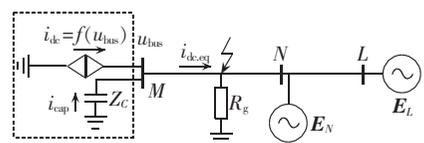


图 1 交直流互联系统等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of AC-DC interconnected system

图 1 中, 虚线框内包含了所要讨论的等值直流系统主要组成部分, 包括逆变器、无功补偿装置及滤波器; i_{dc} 为逆变器交流侧等值电流; i_{cap} 为流过交流滤波器及无功补偿装置的等效阻抗 Z_c 的电流; $i_{dc,eq}$ 为等值直流系统注入交流系统的等值电流; u_{bus} 为交流母线电压。

事实上, 交流侧滤波器除了有滤除谐波的作用以外, 同时具备无功补偿功能。但对于工频量而言, 滤波器组所呈现的阻抗主要为容性, 同时通过分析计算发现, 对于工频量而言, 滤波器的电阻分量相对工频量很小, 因此可以将滤波器与电容器组等无功补偿装置结合在一起, 仅以 Z_c 的方式来表示。

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2015-02-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012-CB215206)

Project supported by the National Basic Program of China (973 Program)(2012CB215206)

1.2 等值工频电流特性分析

由图 1 可知,直流系统注入交流电网的等值工频电流可以表示为:

$$\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}} = \mathbf{I}_{\text{dcl}} + \mathbf{I}_{\text{cap1}} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 、 \mathbf{I}_{dcl} 、 \mathbf{I}_{cap1} 分别为图 1 中各电流的相量形式,下标“1”表示工频分量,下同。

由于直流受端一般靠近区域电网的负荷中心,因此逆变侧通常采用全补偿的无功补偿方式,于是正常运行工况下的 $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 与交流母线相电压 U_1 可视同为同相位^[13]。由式(1)可得正常运行时电压、电流相量的关系如图 2 所示。

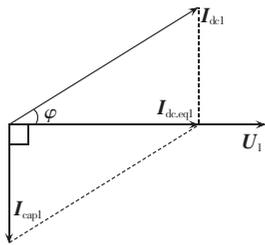


图 2 正常运行时电压、电流相量的关系

Fig.2 Relation between voltage and current phasors in normal operation

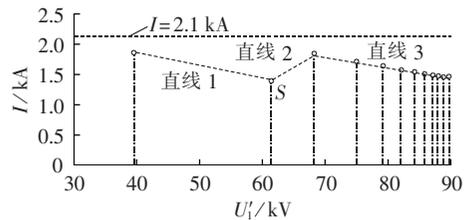
由于直流系统等值工频电流具有非线性的特性,其变化由交流系统和直流系统共同决定,目前还很难通过数学方法定量地得到其解析表达式。另一方面,现有的文献资料均表明,直流换相失败与换相电压的幅值关系最为密切^[14-16],在不同的电压幅值下,等值系统工频电流将呈现出不同的暂态特性。因此,为了不失一般性同时又得到具有普遍意义的结论,本文首先基于 CIGRE HVDC 标准测试模型,在 PSCAD/EMTDC 中通过设置不同的故障,探讨性地给出了不同交流母线电压下的直流系统等值工频电流的幅值及相角变化特性。考虑到继电保护要求速动时间在 30 ms 以内,因此研究幅值和相角的变化特点也应是在故障后 30 ms 以内,故障时间为 0.5 s,故障持续时间 0.05 s。另外,幅值和相角在故障暂态过程中是不断变化的,为了全面表征它们的变化情况,本文采用 30 ms 内幅值和相角的平均值来表征它们的变化规律。表 1 给出了部分仿真结果。基于表 1 的仿真结果,图 3 给出了不同交流母线电压下直流系统注入交流侧的等值工频电流幅值及相位的变化曲线。图 3 中, U_1' 为故障后的交流母线电压幅值; φ_0 为正常运行时 $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 的相角。正常稳态运行时, $U_1 = 106 \angle -75^\circ$ kV, $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}} = 2.1 \angle -75^\circ$ kA。需要指出的是图 3 中所有的故障都造成了换相失败的发生。

为了研究直流系统等值工频电流的特性,最理想的情况是知道在任意交流母线电压下的直流系统等值工频电流的幅值和相角的变化情况,而仿真得到的结果有限,对此本文采用分段直线对仿真结果进

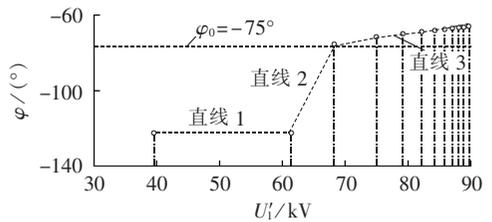
表 1 不同交流母线电压下的直流系统等值工频电流幅值及相位

Table 1 Amplitude and phase of equivalent power-frequency current under different AC bus voltages

过渡电阻/ Ω	U_1' 平均值/kV	电流相位/ $^\circ$	电流幅值/kA
62	89.7217	-66.7490	1.4351
55	88.8217	-66.9415	1.4533
50	88.0188	-67.1433	1.4692
45	87.0195	-67.3931	1.4885
40	85.7712	-67.7687	1.5132
35	84.1601	-68.2972	1.5449
30	82.0111	-69.0452	1.5862
25	79.0508	-70.1646	1.6429
20	74.7775	-71.8806	1.7239
15	68.1951	-74.5655	1.8428
10	61.3044	-121.3352	1.3775
5	39.3608	-123.8733	1.8574



(a) 幅值变化



(b) 相位变化

图 3 等值工频电流幅值及相位的变化曲线

Fig.3 Variation of equivalent power-frequency current amplitude and phase

行拟合,进而得到较为全面的交流母线电压与 $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 的幅值及相位关系,如图 3 所示。

通过图 3 可以看出, $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 与母线电压之间存在如下具体的关系。

a. 由图 3(a)可知,当交流侧故障引发换相失败之后, $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 的幅值较正常稳态运行时要小;另外, $\mathbf{I}_{\text{dc,eq1}}$ 的幅值在母线电压达到某一数值时,可能存在最小值,如图中的 S 点。

b. 由图 3(b)可知,在换相失败期间,直流系统等值电流的相角一般都逆时针转过一定的角度,如图中直线 3 所示;只有当母线电压很低时,相角才会顺时针转过一定的角度,但此时转过的角度值较大,如图中的直线 1、2 所示;另外,当换流母线电压在一定范围时,此时相角对电压的波动非常敏感,如直线 2 所示。

通过上面的分析可以看出,换相失败后,直流系统注入交流侧的等值工频电流不但没有增大,反而

较正常稳态运行时要小,这与纯交流系统中电源注入到短路点的电流远大于负荷电流极为不同;不同的故障程度下等值工频电流的基波相角不但转过的角度不尽相同,而且转过的方向也存在差异,因此势必会对传统的继电保护产生影响。

2 直流馈入对差动保护的影响及防范措施

图 1 中线路 MN 是用来连接逆变换流站和交流开关厂的线路,以往的研究往往忽视了对这段线路的分析。而且由于线路 MN 的一侧与直流系统直接相连,电流畸变程度很大,因此与线路 NL 相比,线路 MN 受换相失败的影响更大。所以下文重点分析直流馈入环境下对这段线路电流差动保护的影响。

2.1 直流馈入对差动保护的影响分析

由上述分析可知,换相失败之后,直流系统注入交流侧的 $I_{dc,eq1}$ 在幅值及相角上都呈现出与纯交流系统不同的特征,即幅值减小,相位可能逆时针或顺时针旋转;交流母线电压较大时, $I_{dc,eq1}$ 将逆时针旋转一定角度;反之,则顺时针旋转。相应的直流系统等值工频变化量电流 $\Delta I_{dc,eq1}$ 如图 4 所示。其中, $\Delta I_{dc,eq1}$ 为正常运行时的等值工频电流,其他为换相失败后的等值工频电流。

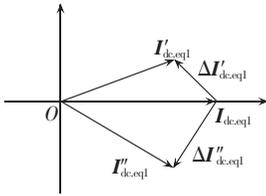


图 4 $\Delta I_{dc,eq1}$ 的变化范围

Fig.4 Variation range of of $\Delta I_{dc,eq1}$

由图 4 可知,若以正常运行时的 $I_{dc,eq1}$ 为参考量,换相失败后的 $\Delta I_{dc,eq1}$ 可能位于第 II、III 象限。这样可以最大限度地保证能分析等值工频电流的最大变化范围,为进一步全面分析直流系统换相失败对差动保护的影响奠定了基础。

2.2 基于故障分量的电流差动保护分析

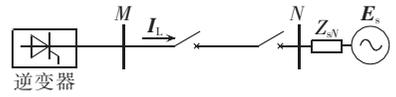
传统的纵联电流差动保护比较线路两侧的全电流,因而受负荷电流影响较为严重。为了消除负荷电流的影响,同时增强保护耐受过渡电阻的能力,利用电流故障分量的差动保护判据得到了广泛的应用,即:

$$|\Delta I_M + \Delta I_N| > K |\Delta I_M - \Delta I_N| \quad (2)$$

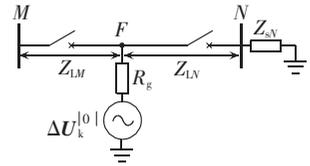
其中, ΔI_M 、 ΔI_N 分别为线路 M 侧和 N 侧的电流故障分量;K 为制动系数。由于基于故障量的电流差动保护消除了负荷分量的影响,因此为了提高保护的灵敏性,相对于稳态量而言可以将制动系数降低;但同时考虑到故障量的计算可能引入误差,为了确保保护不误动,又需要将制动系数在稳态量的基础上提

高一些。根据现场制动系数的整定情况,K 一般可取 0.3~1.0。为了研究的方便,在本文中 K 取 0.5。

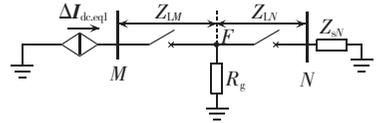
对于图 1 所示的系统,交流侧故障引发直流系统发生换相失败,直流系统的存在相当于在交流故障源之外又叠加了一个故障源。由于换流站电力电子器件的非线性及直流控制保护系统的快速调节,在此暂态过程中,直流系统电气量处于时刻变化之中,但对于一个给定的时间窗,总可以将其分解为基波和各次谐波分量之和,即 $\sum I_{dc,eqn}$,因此对于图 1 中交直流互联系统的网络,若将等值直流系统视作一个外部故障电源,且仅就其中的工频量进行分析,则整个受端网络仍可以视为线性的,它在故障时的暂态响应仍然可以按照叠加原理求得,如图 5 所示。



(a) 正常运行状态



(b) 交流侧等效故障网络



(c) 逆变侧等效故障网络

图 5 叠加电路图

Fig.5 Schematic diagrams of circuit superposition

图 5 中, I_L 为线路电流; Z_{LM} 、 Z_{LN} 分别为 M 侧、N 侧与故障点间线路的阻抗; Z_{sN} 为 N 侧系统阻抗; $\Delta U_k^{0|}$ 为故障前 F 点的反向电压,可以认为与 $-U_1$ 同相。相应地可得到基于故障分量的动作量和制动量分别如式(3)、(4)所示。

$$\Delta I_d = \Delta I_M + \Delta I_N = \frac{(Z_{LN} + Z_{sN}) \Delta I_{dc,eq1} - \Delta U_k^{0|}}{R_g + Z_{LN} + Z_{sN}} = -\frac{\Delta U_k^{0|}}{R_g + Z_{LN} + Z_{sN}} - \frac{R_g}{R_g + Z_{LN} + Z_{sN}} \Delta I_{dc,eq1} + \Delta I_{dc,eq1} \quad (3)$$

$$\Delta I_r = \Delta I_M - \Delta I_N = \frac{2R_g \Delta I_{dc,eq1} + (Z_{LN} + Z_{sN}) \Delta I_{dc,eq1} + \Delta U_k^{0|}}{R_g + Z_{LN} + Z_{sN}} = \frac{\Delta U_k^{0|}}{R_g + Z_{LN} + Z_{sN}} + \frac{R_g}{R_g + Z_{LN} + Z_{sN}} \Delta I_{dc,eq1} + \Delta I_{dc,eq1} \quad (4)$$

记 $A = \Delta U_k^{0|} / (R_g + Z_{LN} + Z_{sN})$ 、 $B = R_g \Delta I_{dc,eq1} / (R_g + Z_{LN} + Z_{sN})$,则式(3)、(4)可以进一步写成:

$$\Delta I_d = \Delta I_M + \Delta I_N = -(A + B) + \Delta I_{dc,eq1} \quad (5)$$

$$\Delta I_r = \Delta I_M - \Delta I_N = A + B + \Delta I_{dc,eq1} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知,为了比较动作量与制动量的

大小,只需比较相量 $A+B$ 与 $\Delta I_{dc,eq1}$ 的夹角即可,若两者夹角小于 90° ,则制动量大于动作量,可能会引起保护的拒动;反之则动作量大于制动量,保护能够正确动作。由上述分析可知, $\Delta I_{dc,eq1}$ 随着故障程度的不同,可能位于第 II、III 象限,因此分别讨论如下。

a. $\Delta I_{dc,eq1}$ 位于第 II 象限。

此时对应过渡电阻较大、交流侧故障较轻的情形,相量图如图 6 所示。由分析可知,相量 A 和 B 分别滞后于 $\Delta U_k^{(0)}$ 和 $\Delta I_{dc,eq1}$,则相量 $A+B$ 与 $\Delta I_{dc,eq1}$ 之间的夹角小于 90° ,因此制动量大于动作量,可能导致保护拒动,具体动作情况还需取决于两者的比值与制动系数 K 之间的大小。

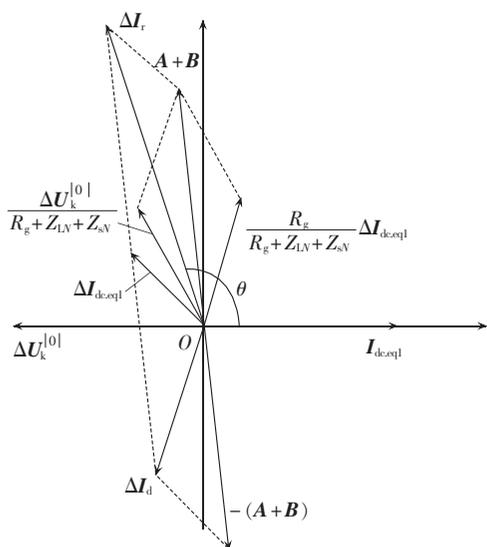


图 6 $\Delta I_{dc,eq1}$ 位于第 2 象限时各相量间的关系

Fig.6 Relation among phasors when $\Delta I_{dc,eq1}$ is in the second quadrant

b. $\Delta I_{dc,eq1}$ 位于第 III 象限。

此时对应过渡电阻较小,故障严重的工况,相量图如图 7 所示。相量 A 和 B 仍然分别滞后于 $\Delta U_k^{(0)}$ 和 $\Delta I_{dc,eq1}$ 。由图 7 可以看出,相量 $A+B$ 与 $\Delta I_{dc,eq1}$ 之间

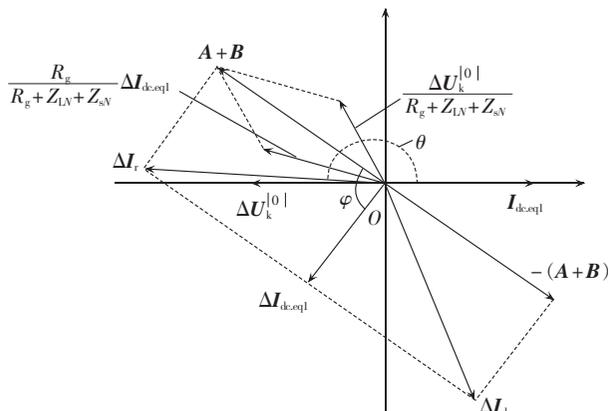


图 7 $\Delta I_{dc,eq1}$ 位于第 3 象限时各相量间的关系

Fig.7 Relation among phasors when $\Delta I_{dc,eq1}$ is in the third quadrant

的夹角 φ 随着 $\Delta I_{dc,eq1}$ 的位置不同而不同。若 $\varphi > 90^\circ$,则 $\Delta I_d > \Delta I_r$,保护正确动作;若 $\varphi \leq 90^\circ$,则 $\Delta I_d \leq \Delta I_r$,保护可能会拒动。

2.3 基于稳态量的电流差动保护分析

根据故障分析理论可以知道,稳态量等于故障量叠加上负荷分量,即式(2)变为:

$$|\Delta I_M + \Delta I_N| > K_1 |\Delta I_M - \Delta I_N + 2I_L| \quad (7)$$

其中, K_1 为制动系数,一般可取为 0.5。显然 $I_L(I_{dc,eq1})$ 只影响了制动量,影响程度取决于 ΔI_r 与 $\Delta I_{dc,eq1}$ 间的夹角 θ ,当 $\theta < 90^\circ$ 时对保护正确动作不利;当 $\theta > 90^\circ$ 时保护能否正确动作还取决于 $I_{dc,eq1}$ 的具体大小。同时 θ 的大小与 $\Delta I_{dc,eq1}$ 所处象限的具体位置、过渡电阻、交流系统强度都有关系,因此换相失败对基于稳态量的判据影响较为复杂,不同工况下对保护的影响不同。限于篇幅,本文将不再详细阐述。

2.4 防范措施

传统的电流差动保护实际上利用了电流的幅值和相角特征来识别区内故障和其他工况。对于交直流互联系统而言,由于互联系统自身的特点决定了换相失败期间相角变化很大,反而使得传统的差动保护判据容易拒动。在混连系统中,由于直流控制的原因,在区内故障时,无论交流侧故障是否引发了换相失败,此时线路两侧电流的幅值差异很大。但在线路正常运行或者区外故障时,两侧电流的幅值几乎相等,即 $I_M/I_N \approx 1$ 。考虑到测量误差等因素的影响,可以取 $K = I_M/I_N \in (0.95, 1.05)$ 。当幅值的比值 K 位于该区间以外时,则判为区内故障。新的差动保护的判别逻辑如图 8 所示。

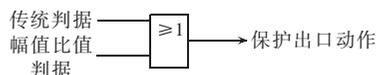


图 8 本文所提保护判据逻辑

Fig.8 Logic of proposed protection criterion

新的判别逻辑可能无法做到在任何工况下都能准确动作,但至少比单一的利用传统差动保护判据的性能有所提高。

3 仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 搭建如图 1 所示的仿真模型,图中直流系统采用国际大电网会议 CIGRE 的 HVDC 标准模型,受端交流系统短路容量比为 3.6,线路 MN 全长为 30 km,参数为: $r_1 = 2.5 \times 10^{-5} \Omega/m$, $x_1 = 3 \times 10^{-4} \Omega/m$, $r_0 = 7.5 \times 10^{-5} \Omega/m$, $x_0 = 9 \times 10^{-4} \Omega/m$ 。采样频率 4000 Hz,所有故障均设置在 0.5 s 发生,持续时间为 0.05 s,仿真中所有的故障均引发了换相失败故障。

3.1 换相失败对差动保护的影响的仿真分析

图 9 是在线路距 M 侧 10 km 处发生 A 相经 50 Ω

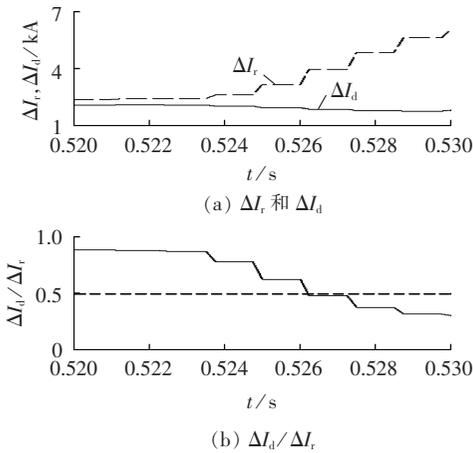


图 9 距 M 端 10 km 处发生故障时的仿真结果
Fig.9 Simulative results when fault occurs at 10 km from M

过渡电阻接地故障下的仿真结果。本文采用全周傅氏算法提取工频量,因此故障后 20 ms 输出波形。由图 9(a)可以看出,此时的制动量大于动作量,而由于故障初期动作量和制动量的幅值 ΔI_d 与 ΔI_r 的值较为接近,因此两者的比值在故障初期将大于制动系数整定值 0.5,这对保护的动作用是十分有利的。但如果保护不能立即动作,此后 ΔI_d 与 ΔI_r 的比值将小于 0.5,容易造成保护拒动。

图 10 是在线路距 M 侧 5 km 处发生 A 相经 34 Ω 过渡电阻接地故障下形成的仿真分析图。由图 10(a)可知此时的制动量明显大于动作量。而从图 10(b)可知,此时的故障造成 ΔI_d 与 ΔI_r 的比值一直小于 0.5,因此将导致保护的拒动。

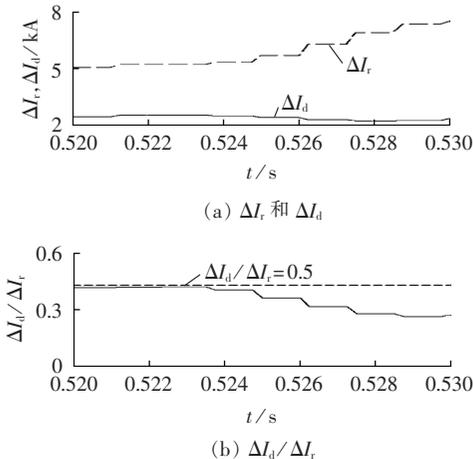


图 10 距 M 侧 5 km 处发生故障时的仿真结果
Fig.10 Simulative results when fault occurs at 5 km from M

图 11 是在线路中点发生 A 相经 5 Ω 过渡电阻接地故障下形成的仿真分析图。由图 11(a)、(b)可知,此时动作量大于制动量,进而两者的比值也一直大于整定值 0.5,因此保护能够正确动作。

综上所述,在过渡电阻较大时,由于制动量大于

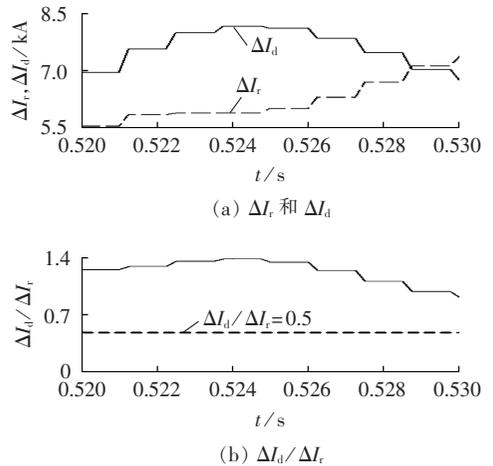


图 11 线路中点发生故障时的仿真结果
Fig.11 Simulative results when fault occurs in middle of transmission line

动作量,所以可能引发保护的拒动,如图 8、9 所示;而过渡电阻较小时,动作量与制动量的大小随着相量 $A+B$ 与 $\Delta I_{dc,eq1}$ 的夹角的变化而呈现不同的相对大小关系,保护有可能正确动作的,如图 11 所示。

3.2 防止保护拒动的措施

图 12(a)、(b)分别对应于图 9 与图 10 的故障形式,由图 12 可以看出,仅基于幅值判据可以准确判为内部故障,保护可以准确动作。

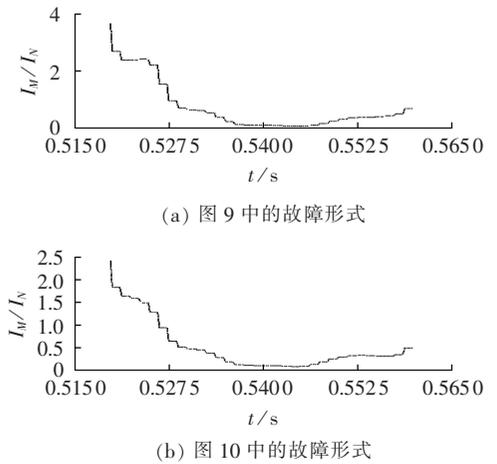


图 12 幅值判据的仿真结果
Fig.12 Simulative results of amplitude criterion

4 结论

换相失败后,直流系统注入交流侧的等值工频电流与纯交流系统的短路电流具有不同的特征,即幅值减小,相角波动范围大,上述故障特性的畸变对差动保护带来的影响,可能会造成区内故障时制动量大于动作量,引发保护的拒动;仅基于幅值的判据能很好地识别区内故障,通过与传统的差动保护判据相配合,在交直流互联系统中体现出了较强的优越性。

参考文献:

- [1] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982: 164-185.
- [2] 袁阳, 卫志东, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
YUAN Yang, WEI Zhong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [3] HU L, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [4] 张汝莲, 赵成勇, 卫鹏杰. 直流馈入后交流线路故障对换相失败瞬态特征的影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 82-87.
ZHANG Rulian, ZHAO Chengyong, WEI Pengjie. Influence of AC line faults on HVDC commutation failure transient characteristic in DC/AC interconnected power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 82-87.
- [5] 孔飞, 张保会, 王艳婷, 等. 超高速直流输电线路方向保护元件[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 83-88.
KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting, et al. Ultra-high-speed directional element of relay protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 83-88.
- [6] 韩昆仑, 蔡泽祥, 徐敏, 等. 高压直流输电线路微分欠压保护特征量动态特性分析与整定[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 114-119.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, XU Min, et al. Dynamic characteristic analysis and setting of characteristic parameters of differential under-voltage protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 114-119.
- [7] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. 800 kV 特高压直流输电线路故障定位小波能量谱神经网络识别法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 141-148.
LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Fault location based on wavelet energy spectrum and neutral network for 800 kV UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 141-148.
- [8] 张璞, 王钢, 李海锋. 直流馈入下的输电线路距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 56-62.
ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng. Performance of distance protection for transmission lines in an HVDC/AC interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 56-62.
- [9] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓东, 等. 多馈入高压直流输电系统中功率倒向问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 22-27.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Power converse in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 22-27.
- [10] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一)直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 41-46.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part one DC-system equivalent impedance of power-frequency component variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 41-46.
- [11] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(二)故障线路的方向保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 47-53.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part two response of the directional protection for faulted line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 47-53.
- [12] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(三)非故障线路的方向保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 43-48.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part three response of the directional protection for unfaulted lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 43-48.
- [13] 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.
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.
- [14] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [15] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [16] 刘强, 蔡泽祥, 刘为雄, 等. 交直流互联系统暂态功率倒向及对继电保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 34-38.
LIU Qiang, CAI Zexiang, LIU Weixiong, et al. Transient power converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 34-38.

作者简介:



申洪明

申洪明(1988—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: shen198806@126.com);

黄少锋(1958—), 男, 福建福州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

费彬(1989—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(下转第 120 页 continued on page 120)

Criterion of HVDC line differential protection blocking based on spectrum comparison

LI Aimin¹, CAI Zexiang², SUN Qizhen³, XU Min⁴

(1. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510640, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 510600, China; 4. EPRI of CSG, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the long operation time of HVDC line differential protection, a blocking criterion based on spectrum comparison is proposed. The spectrum characteristics of differential current are analyzed and the analytical results show that, it contains more DC component during the in-zone fault while contains more 50 Hz and 100 Hz components during the out-zone fault, according to which, a blocking criterion is designed. With high reliability and low sampling frequency, it identifies the in-zone and out-zone faults efficiently. A simulation model is built with EMTDC based on an actual HVDC system and the simulative results show that, the differential protection is blocked during the out-zone fault according to the proposed criterion, improving the protection reliability.

Key words: HVDC power transmission; relay protection; differential protection; blocking; spectrum analysis; reliability; computer simulation; failure analysis

.....
(上接第 114 页 continued from page 114)

Transient characteristic of HVDC system during commutation failure, its effect on differential protection and countermeasures

SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Source,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The relation between equivalent power-frequency current and converter bus voltage during the commutation failure of DC system is obtained based on the CIGRE HVDC benchmark model. The criterion expression of current differential protection for AC-DC interconnected system is deduced and the differential protection connected to DC power system for transmission line is analyzed. The analytical results indicate that, the differential protection may reject to act when in-zone fault occurs in AC-DC interconnected operation. It is proposed to detect the internal fault based on the amplitude criterion. Simulative results by PSCAD/EMTDC validate the correctness of theoretical analysis and the effectiveness of proposed criterion.

Key words: HVDC power transmission; commutation failure; transients; transient characteristic; equivalent power-frequency current; differential protection; relay protection; amplitude criterion