

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.010

考虑换相失败影响的交流线路单相故障性质判据

李凤婷¹, 刘雨姝¹, 解超¹, 刘建勋¹, 黄飞²

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830046; 2. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆维吾尔自治区 昌吉 831100)

摘要: 逆变侧交流线路电流幅值受直流换相失败影响在单相跳闸后出现短时波动, 该波动范围会随着直流换相失败次数增加而增大, 造成基于恢复电压幅值的传统单相故障性质判据发生误判。针对这一问题, 首先搭建输电线路故障相等值模型, 评估直流换相失败对健全相电压的影响, 推导出不同故障性质下恢复电压阶段断开相电压时域表达式; 其次根据断开相时域电压波形的差异性进行积分计算, 提出基于时域电压积分的单相故障性质识别判据; 最后利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建模型对所提判据进行验证。结果表明, 文中所提方法的耐过流电阻能力良好, 具有一定的抗直流干扰能力, 所提判据在直流换相失败条件下依然能够可靠判别故障性质。

关键词: 单相跳闸; 换相失败; 恢复电压幅值; 健全相电压; 时域电压; 单相故障性质判据

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)06-0082-09

0 引言

高压直流输电凭借其传输功率大、线路造价低的优势广泛应用于远距离输电和区域互联, 中国已建成世界上最大的交直流混联电网^[1-2]。交直流系统间存在复杂的耦合特性^[3], 有可能影响单相重合闸判定准确性^[4-6], 若重合失败, 可能会使直流系统发生连续换相失败甚至闭锁^[7-8]。因此, 须研究一种能准确判别逆变侧交流架空线路故障性质且不受直流特性影响的单相故障性质判据。

现有研究中, 用于判定交流线路故障性质的参考电气量特征主要有电弧特性^[9-11]、恢复电压特性^[12-14]、并联电抗器电流特性^[15-17]。交流线路有直流馈入时, 相对传统纯交流系统, 线路电气量有可能因直流换相失败的影响而呈现一定的波动性^[18-19]。因此, 传统单相故障性质判据在交直流混联系统中可靠性降低^[20-21]。针对这一问题, 已有部分学者提出了解决方案, 文献[22]利用故障相等值阻抗相位的差异判别故障, 从而降低交流故障引发直流换相失败的风险, 但未研究是否受换相失败的影响。文献[23]针对传统判据在交直流混联系统中适用性差的缺点, 采用换相失败期间闭锁判据的方法, 但影响快速性。文献[24]提出基于谐波电流幅值比的重合闸判据, 消除直流馈入谐波分量的影响, 但未考虑不带并联电抗器的场景。以上文献均未考虑直流发生连续换相失败致使电气量波动时间延长, 影响传统判据快速性及可靠性的问题。

文中首先通过不同换相失败工况下逆变侧交流线路电气量的变化特征, 分析基于恢复电压幅值的单相故障性质判据在交直流混联系统中的适用性; 其次, 推导建立瞬时性故障与永久性故障断开相电压的时域表达式, 根据 2 种故障波形的差异性提出基于断开相时域电压积分的单相故障性质判据。该判据具有一定的抗直流干扰能力, 有望提高直流换相失败条件下的故障判别可靠性。

1 直流馈入对恢复电压的影响

1.1 逆变侧健全相电气量变化特征

交直流混联系统中, 交流侧故障引发直流换相失败时, 馈入到交流系统的直流等值电流幅值与相位将发生变化。为分析含直流馈入的交流系统各相电气量信号变化特征, 构建直流馈入下交流输电线路等效电路, 如图 1 所示。图中 C 为电容器组, 作为直流系统的无功补偿装置并入直流线路中; \dot{I}_{eq} 为直流系统注入的等效电流; \dot{U}_m 为换流母线电压; Z_m, Z_n 为故障点到两端线路的等值阻抗; R_g 为故障处等值电阻; \dot{E}_s 为受端系统交流电源等值电压; Z_s 为交流电源内阻抗。

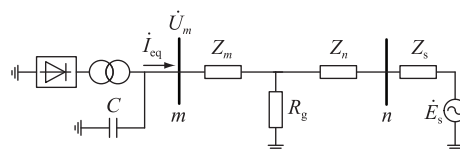


图 1 直流馈入下交流输电线路等效电路

Fig.1 The equivalent circuit of AC transmission line under DC feed

由图 1 可得, 逆变侧交流母线电压表达式为:

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877185)

$$\dot{U}_m = \dot{I}_{eq} Z_m + \frac{R_g}{R_g + Z_s + Z_n} [\dot{I}_{eq}(Z_s + Z_n) - \dot{E}_s] \quad (1)$$

因此,换流母线电压 \dot{U}_m 由交流电源等值电压 \dot{E}_s 和直流注入等效电流 \dot{I}_{eq} 共同决定。由电路原理可知,健全相电压 \dot{U}_B 和 \dot{U}_C 的表达式为:

$$\begin{cases} \dot{U}_B = \dot{U}_m \angle -120^\circ \\ \dot{U}_C = \dot{U}_m \angle 120^\circ \end{cases} \quad (2)$$

健全相电压与换流母线电压 \dot{U}_m 相关, \dot{U}_m 和 \dot{I}_{eq} 的大小受直流系统的工作状态影响。正常换相状态下, \dot{U}_m 与 \dot{I}_{eq} 同相位;故障后无换相失败时, \dot{U}_m 略微下降, \dot{I}_{eq} 略微上升;故障后发生换相失败时, \dot{U}_m 严重下降, \dot{I}_{eq} 随换流阀输出电流的减小开始下降。结合调制理论,直流系统注入的等值工频电流 $\dot{I}_{eq(1)}$ 可表示为:

$$\dot{I}_{eq(1)} = I_{dc(0)} S_{i\varphi(1)} \quad (3)$$

式中: $I_{dc(0)}$ 为直流电流的直流分量; $S_{i\varphi(1)}$ 为三相电流开关函数的基频分量, φ 取 A、B、C。因此, \dot{I}_{eq} 的大小受直流系统的工作状态影响出现波动,而 \dot{U}_m 受 \dot{I}_{eq} 的影响呈现波动性。由式(2)知,健全相电压 \dot{U}_B 和 \dot{U}_C 由换流母线电压 \dot{U}_m 决定,亦呈现波动性。

健全相电流 \dot{I}_B 和 \dot{I}_C 表达式为:

$$\begin{cases} \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z} \\ \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)知,健全相电流由其两端相电压和线路阻抗 Z 决定,故健全相电压 \dot{U}_B 和 \dot{U}_C 的波动也会导致健全相电流 \dot{I}_B 和 \dot{I}_C 幅值的波动。

1.2 逆变侧电气量变化对故障相端电压的影响

对于不带并联电抗器的单回线路,瞬时性故障时恢复电压与电容耦合电压 \dot{U}_y 和互感电压 \dot{U}_x 有关,由文献[12]可知,两者的表达式为:

$$\dot{U}_y = (\dot{U}_B + \dot{U}_C) \frac{C_M}{2C_M + C_0} \quad (5)$$

$$\dot{U}_x = (\dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_M \quad (6)$$

式中: C_M, C_0 分别为单位长度线路的相间电容和相对地电容; Z_M 为单位长度线路的相间互感抗。瞬时性故障时,长度为 L 的输电线路断开相两端电压由

电容耦合电压 \dot{U}_y 和互感电压 \dot{U}_x 决定,其值可简化为:

$$|\dot{U}_{Am}| = |\dot{U}_{An}| = \sqrt{U_y^2 + \left(\frac{L}{2} U_x\right)^2} \quad (7)$$

永久性故障时故障点始终存在对地电容可靠放电,电容耦合电压为 0,线路两端只剩互感电压 \dot{U}_x ,故断开相恢复电压为:

$$\dot{U}_A = \alpha \dot{U}_x \quad (8)$$

式中: α 为短路点到重合闸安装处的距离与线路全长的比值。因此,断开相恢复电压的值由互感电压与短路点位置决定。

由 1.1 节的分析可知,直流馈入影响下健全相的工频电压幅值波动。由式(5)可知,电容耦合电压将波动,健全相电压的波动造成健全相工频电流幅值波动,由式(6)可知,互感电压将波动;电容耦合电压和互感电压的波动将导致断开相恢复电压幅值发生一定程度的向下波动,且随着直流换相失败次数增多,健全相电压与电流所受影响增大,断开相恢复电压幅值波动的时长增加,基于恢复电压幅值的故障识别判据更易发生误判。

1.3 直流馈入下逆变侧故障电气量变化仿真分析

换相失败可分为单次换相失败、2 次连续换相失败和多次换相失败^[25-27],不同换相失败工况下逆变侧故障电气量变化也不同。为分析逆变侧交流线路单相接地故障后健全相电压及电流变化的具体情况,搭建基于 CIGRE 标准模型的交直流混联系统电磁暂态仿真模型,如图 2 所示。其中直流电压等级为 ± 500 kV;送、受端系统交流电源 P、Q (Q_1 、 Q_2) 均为 230 kV;线路 L_1 长 400 km;线路单位正序电阻、电抗、电纳分别为 $r_1 = 0.0178 \Omega/\text{km}$, $x_1 = 0.313 \Omega/\text{km}$, $b_1 = 3.644 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$;线路单位零序电阻、电抗、电纳分别为 $r_0 = 0.295 \Omega/\text{km}$, $x_0 = 1.03 \Omega/\text{km}$, $b_0 = 2.419 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。假设在 1 s 时距 m 端 10 km 的 F 点发生 A 相接地故障,过渡电阻分别设为 2Ω 和 200Ω ,直流系统发生多次换相失败和 2 次连续换相失败,故障持续时间 0.1 s,断路器跳闸时刻为 1.06 s。

在 230 kV 的纯交流系统中设置相同故障,对比 2 种系统的电气量变化特征。交直流混联系统中逆变侧交流系统单相跳闸后健全相电压与电流幅值如图 3 所示,纯交流系统单相跳闸后健全相电压与电流幅值如图 4 所示。

由图 3 可知,在交直流混联系统中,2 次连续换相失败时 U_B, U_C 在故障发生后幅值瞬时跌落 30 kV

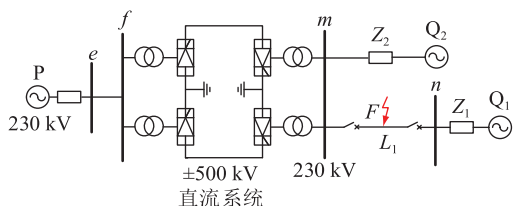
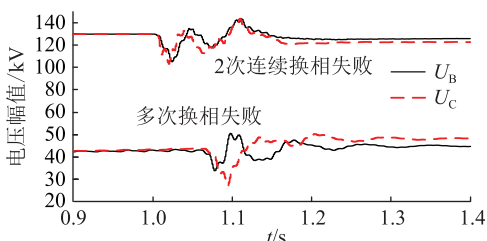
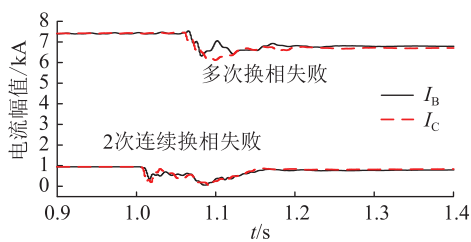


图2 交直流混联系统示意

Fig.2 Schematic diagram of AC/DC hybrid system



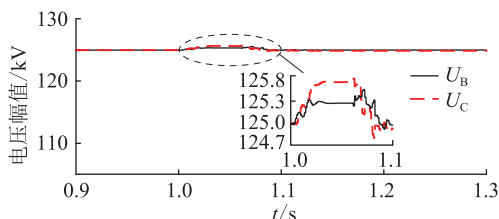
(a) 不同换相失败工况下健全相电压幅值



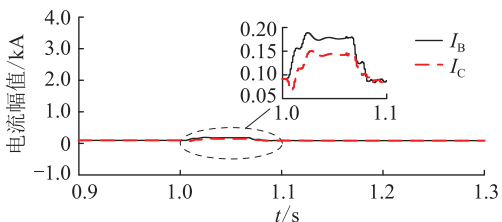
(b) 不同换相失败工况下健全相电流幅值

图3 逆变侧不同换相失败工况下健全相电压和电流幅值

Fig.3 Sound phase voltage and current amplitude under different commutation failure conditions on inverter side



(a) 健全相电压幅值



(b) 健全相电流幅值

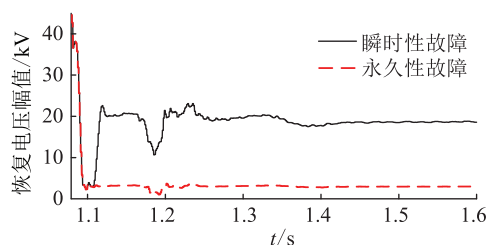
图4 纯交流系统单相跳闸后健全相电压和电流幅值

Fig.4 Sound phase voltage and current amplitude after single-phase trip of pure AC system

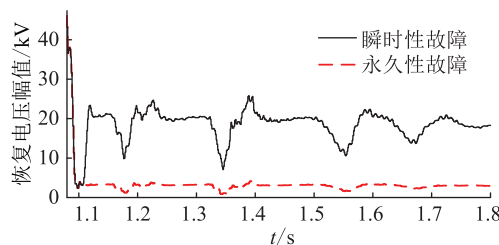
左右, I_B, I_C 最低跌落到 0, 随着直流系统的控制调节, 幅值开始上升, 故障消失后逐渐恢复到正常值; 多次换相失败时, 换流母线电压降低, 等值工频交流电流幅值上升, U_B, U_C 在 1.06 s 时从 43 kV 开始跌落, 最低跌落至 26 kV, I_B, I_C 在 1.06 s 时从 7.5 kA

开始下降, 在 1.2 s 左右恢复正常值; 且随着换相失败次数增多, 幅值出现上下波动的时间延长。由图 4 可知, 纯交流系统单相跳闸后健全相电压、电流在故障期间幅值出现微小变化, 几乎稳定在恒定值。综上, 交直流系统中故障相跳闸后输电线路故障电气量与纯交流系统相比具有差异性。

基于图 2 的模型和参数, 仿真分析逆变侧断路器跳闸后故障相两端恢复电压幅值的变化特征, 研究不同换相失败工况对恢复电压的影响, 具体情况如图 5 所示。



(a) 2次连续换相失败时不同故障性质下恢复电压幅值



(b) 多次换相失败时不同故障性质下恢复电压幅值

图5 不同换相失败工况下恢复电压幅值

Fig.5 Recovery voltage amplitude under different commutation failure conditions

由图 5 可知, 发生 2 次连续换相失败时, 瞬时性故障下恢复电压幅值严重跌落, 从 20 kV 下降到 10 kV; 多次换相失败时, 幅值上下波动时间延长, 持续到 1.8 s, 长时间的波动将影响故障识别判据, 在重合时发生误判。纯交流系统中恢复电压幅值稳定为一常数, 因此, 基于恢复电压幅值的判据在交直流系统中存在适用性问题。

2 基于恢复电压的故障识别判据适用性分析

以文献[12]提出的基于测定故障相两端恢复电压的大小是否超过整定值来区分故障性质的判据为例进行分析。电压继电器整定值 U_{DZ} 为:

$$U_{DZ} = \frac{K_k(Z_{0L} - Z_{1L})I_{HA}}{1 + 2Z_{0\Sigma}/Z_{1\Sigma}} \quad (9)$$

式中: K_k 为可靠系数, 设定 $K_k \in [1.1, 1.2]$; I_{HA} 为故障相负载电流; Z_{1L}, Z_{0L} 分别为线路正序阻抗和零序阻抗; $Z_{1\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ 分别为系统的综合正序阻抗和综合零序阻抗。将根据图 2 模型实测的不同工况下瞬时性故障恢复电压幅值与利用系统和线路已知的相关

参数算出的整定值相比较,验证上述推导,结果如表1所示。表1中 U 为故障相端电压幅值;10%,90%为短路位置到线路首端的距离与线路全长的比值。 K_k 取1.1,将相关参数代入式(9),计算得到 U_{DZ} 为16.348 kV。

表1 文献[12]判据验证结果

Table 1 Criterion verification results of literature 12

换相失败类型	短路位置	故障性质	U/kV	是否大于 U_{DZ}	判定结果
2次连续换相失败	10%	瞬时	11.8	否	永久
	10%	永久	7.1	否	永久
多次换相失败	10%	瞬时	11.2	否	永久
	10%	瞬时	7.4	否	永久
未发生换相失败	90%	永久	13.9	否	永久
	90%	瞬时	16.8	是	瞬时

以文献[14]提出的利用恢复电压阶段直流偏移量 U_0 与基波电压幅值 U_1 之比 k 判别故障为例进行分析。若 k 大于0.9且持续时间超过20 ms,则认定为瞬时性故障,即:

$$k = \frac{U_0}{U_1} > 0.9 \quad (10)$$

基于图2模型,设置不同类型的换相失败故障,采用傅里叶分析提取 U_0 和 U_1 ,计算其比值,探究文献[14]所提判据在交直流混联系统中的适应性,具体结果如图6所示。

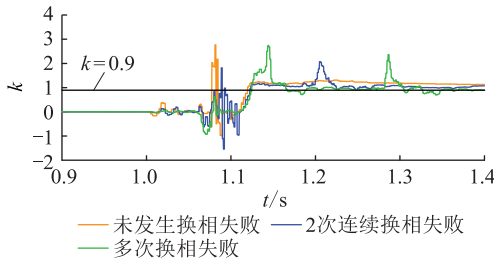


图6 逆变侧故障相电压直流分量与基波分量幅值比

Fig.6 Amplitude ratio of DC component and fundamental component of faulty phase voltage on inverter side

由表1知,发生换相失败时,传统判据会出现误判情况,由于换相失败影响恢复电压幅值向下波动,故均为瞬时性故障误判;未发生换相失败时,恢复电压受直流馈入影响较小,传统判据正确适用。由图6可知,发生换相失败时故障相直流分量与基波分量幅值比出现上下波动,其中,2次连续换相失败时 k 值接近0.9,多次换相失败时 k 值多次位于0.9以下,低于整定值,会将瞬时性故障误判为永久性故障,影响判据的可靠性。因此,受换相失败的影响,基于恢复电压幅值的故障判据已不适用于交直流混联系统,为适应新的电力系统网架结构,须

提出新的解决措施。

3 基于恢复电压阶段故障相时域电压的识别判据

3.1 瞬时性故障下断开相电压全量特征分析

瞬时性故障恢复电压包含电容耦合电压和电磁耦合电压,建立图7所示含直流馈入的三相等值电路,忽略线路阻抗。图中 C_m 为相间耦合电容, C_1 为对地耦合电容。

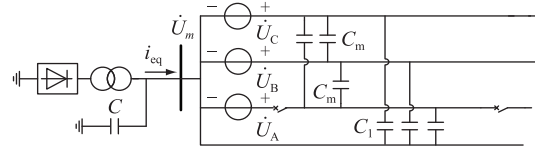


图7 逆变侧输电线路单相接地故障耦合电路

Fig.7 Single-phase ground fault coupling circuit of the transmission line on inverter side

由文献[23]可知,正常换相时馈入逆变侧的直流等值电流 $i_{eq\varphi}$ 可表示为直流侧电流 i_d 与开关函数 $S_{i\varphi}$ 的时域乘积:

$$i_{eq\varphi} = i_d S_{i\varphi} = \frac{4\sqrt{3}i_d \sin(\mu/2)}{\pi\mu/2} \left(\cos(\omega t + \psi_\varphi) + \frac{1}{11} \cos(11\omega t + 11\psi_\varphi) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t + 13\psi_\varphi) + \dots \right) \quad (11)$$

式中: μ 为换相角; $S_{i\varphi}$ 为三相电流的开关函数, φ 取A、B、C; ψ_φ 为三相电流开关函数的初相角。根据式(11)可知,逆变侧电流包含 $12k \pm 1$ 次谐波,经滤波器滤除大部分谐波后,对于交流线路而言可忽略谐波的影响,考虑直流换相失败及换流阀非线性影响的逆变侧电流信号 $i'_{eq\varphi}$ 为:

$$i'_{eq\varphi} = \frac{1}{2} i'_d A_{1i} (\cos(\xi - \psi_\varphi) + \cos(2\omega t + \xi + \psi_\varphi)) + i_d A_{2i} \cos(2\omega t + \xi_\varphi) + \frac{1}{2} i'_d A_{3i} (\cos(\omega t + \xi_\varphi - \xi) + \cos(3\omega t + \xi_\varphi + \xi)) + i_{eq\varphi} \quad (12)$$

式中: i'_d 为换相失败后直流侧电流; A_{ni} 为对应的傅里叶系数, $n=1,2,3$; ξ_φ 为换相失败后开关函数的初相角; ξ 为换相失败直流侧电流初相角。由式(12)可知,换相失败后直流馈入使逆变侧电流含有直流分量及二、三次谐波为主导的谐波分量,影响故障相端电压幅值。

为推导电容耦合电压瞬时表达式,将图7所示线路耦合电路简化为图8。

在图8中利用节点电压法求解电容耦合电

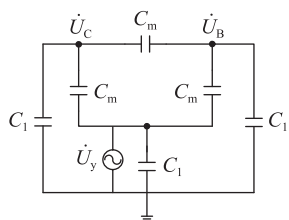


图8 逆变侧输电线路单相接地故障简化电路

Fig.8 Simplified circuit for single-phase ground fault of transmission line on inverter side

压 \dot{U}_y :

$$(j\omega C_1 + 2j\omega C_m)\dot{U}_y - j\omega C_m\dot{U}_C - j\omega C_m\dot{U}_B = 0 \quad (13)$$

$$\dot{U}_y = \frac{j\omega C_m(\dot{U}_B + \dot{U}_C)}{j\omega C_1 + 2j\omega C_m} \quad (14)$$

根据式(14)建立图9所示运算电路,由于电弧的存在,故障消失瞬间,对地电容的充电电压很小,相间电容的充电电压很大,故相间电容支路存在附加电源 $U_m(0)$ 。

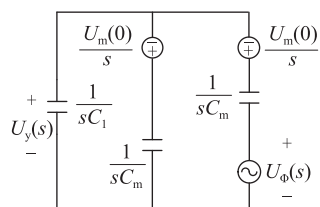


图9 电容耦合电压运算电路

Fig.9 Capacitance coupling voltage calculation circuit

图9中, $U_\phi(s) = U_B(s) + U_C(s)$, 利用节点电压法求解运算电路,则电容耦合电压的表达式为:

$$(sC_1 + sC_m + sC_m)U_y(s) = \left(U_\phi(s) - \frac{U_m(0)}{s} \right) sC_m - \frac{U_m(0)}{s} sC_m \quad (15)$$

$$U_y(s) = \frac{C_m}{C_1 + 2C_m} U_\phi(s) - \frac{2C_m}{C_1 + 2C_m} \cdot \frac{U_m(0)}{s} \quad (16)$$

交流输电线路三相电压时域表达式为正弦函数,设 $U_\phi(t) = U_{\max} \sin(\omega t + \theta)$, 对式(16)进行拉普拉斯反变换可得电容耦合电压的时域表达式为:

$$U_y(t) = \frac{C_m}{C_1 + 2C_m} U_\phi(t) - \frac{2C_m}{C_1 + 2C_m} U_m(0) \quad (17)$$

由式(17)知,电容耦合电压由正弦分量和直流分量组成,恢复电压由电容耦合电压和式(6)的互感电压叠加而成,直流分量的存在会产生直流偏移,造成恢复电压偏向负半轴。由式(12)知逆变侧等值电流存在的谐波影响互感电压,造成恢复电压

在换相失败期间发生波动。

3.2 永久性故障下断开相电压全量特征分析

对于永久性故障,故障点一直存在,线路可靠接地。当过渡电阻为0时,在稳态情况下恢复电压不存在电容耦合电压分量,其值仅由式(6)决定;当过渡电阻不为0时,故障相两端电压中的电容耦合电压分量不为0,但过渡电阻为一定值,衰减时间常数非常小,故障相两端电压只包含稳定的工频电压分量,其瞬时表达式为:

$$U(t) = U_1 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (18)$$

式中: U_1, ω, φ_0 分别为永久性故障断开相工频电压分量的幅值、角频率、初相位。同瞬时性故障时直流馈入对恢复电压造成的影响一致,换相失败期间,直流馈入的谐波会造成工频电压的波动。永久性故障断开相电压的成分随过渡电阻阻值的不同而不同,随过渡电阻阻值增大而增大,断开相电压受线路故障位置、过渡电阻大小影响,其变化趋势如图10所示。

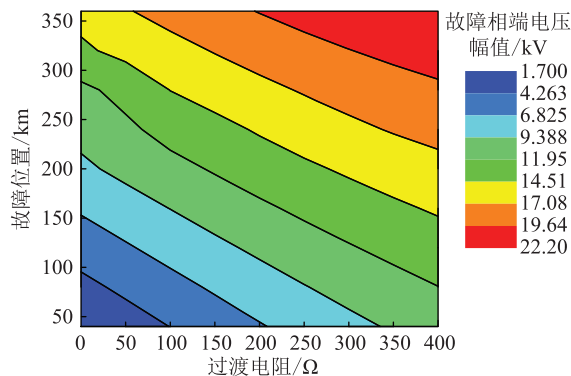


图10 永久性故障下断开相端电压幅值

Fig.10 Voltage amplitude of disconnected phase terminal under permanent fault

3.3 基于断开相时域电压积分的故障性质识别判据

由3.2节分析可知,直流馈入对故障相时域电压造成的影响为故障相电压前2个周波发生畸变。若对2种故障性质的断开相时域电压波形进行全周积分,积分值具有很大差异。基于积分结果提出的故障性质判据可忽略换相失败造成电压幅值波动的影响,适用于换相失败期间也适用于正常换相期间,具体判据如下:

$$\eta = \int_0^{\Delta t} u_A dt > \eta_{set} \quad (19)$$

式中: u_A 为断开相的时域端电压; Δt 为恢复电压阶段从二次电弧熄灭到判定故障的时间区间; η_{set} 为整定值。当计算出的断开相电压积分值 η 大于 η_{set} 时,判定线路为瞬时性故障,否则为永久性故障。整定值的设定原则为:

$$\eta_{\text{set}} = K_{\text{rel}} \frac{\eta_{\text{up}} + \eta_{\text{low}}}{2} \quad (20)$$

$$\eta_{\text{up}} = \int_0^{\Delta t} u_{A1} dt \quad (21)$$

$$\eta_{\text{low}} = \int_0^{\Delta t} u_{A2} dt \quad (22)$$

考虑到过渡电阻及故障点位置对故障相电压的影响, u_{A1} 取瞬时性故障下偏移程度最严重时的断开相端电压; u_{A2} 取永久性故障下振幅最大时的断开相端电压; K_{rel} 为可靠系数, $K_{\text{rel}} \in [0.3, 0.5]$, 取 K_{rel} 为 0.4。计算可得 $\eta_{\text{set}} = 6.54$ 。

4 换相失败影响下故障性质识别判据的仿真验证

以图 2 所示模型为仿真算例验证所提判据的准确性, 线路参数不变。为最大限度接近实际运行情况, 在故障消失时加入电弧模型, 模拟线路产生电弧。故障点位于邻近直流系统线路首端, 设置发生单相接地故障时刻为 1 s, 故障持续时间 0.1 s, 断路器在 1.06 s 单相跳闸, 故障熄弧时间为 1.1 s。断开相时域电压波形如图 11 所示。

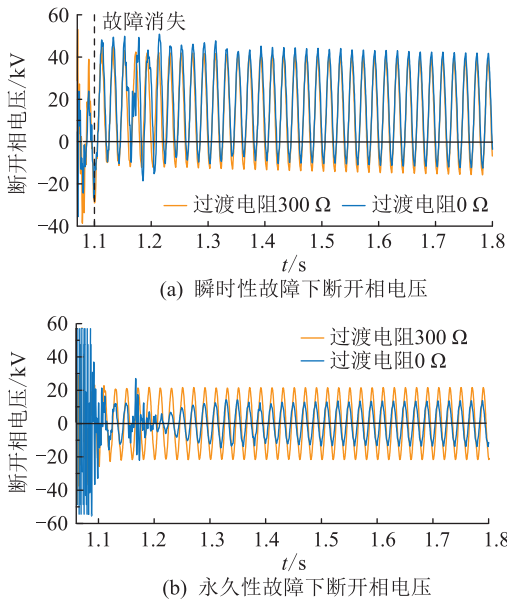


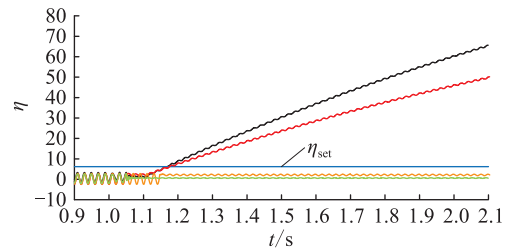
图 11 断开相时域电压波形

Fig.11 Time-domain voltage waveforms of the disconnected phase

瞬时性故障下, 故障消失后, 断开相电压产生直流偏移, 其时域波形为大部分幅值位于零点之上且向负半轴偏移的正弦函数, 过渡电阻的增大使偏移程度发生微小变化; 永久性故障下, 断开相电压为关于零点上下对称的正弦函数, 过渡电阻的增大使断开相时域电压振幅增大; 当线路经金属性过渡电阻接地时, 直流系统发生多次换相失败, 换相失

败造成断开相电压在前 2 个周波发生畸变, 但对积分结果无影响。仿真结果表明第 3 章理论分析正确。

改变过渡电阻阻值, 验证判据的耐过渡电阻能力, 仿真结果如图 12 所示。改变故障点位置, 分析故障点对判据的影响, 仿真结果如图 13 所示。研究不同换相失败工况下判据识别故障性质能力, 仿真结果如图 14 所示。



— 过渡电阻 0 Ω(瞬时性故障) — 过渡电阻 300 Ω(瞬时性故障)
— 过渡电阻 0 Ω(永久性故障) — 过渡电阻 300 Ω(永久性故障)

图 12 不同过渡电阻下断开相电压积分值

Fig.12 Integral value of disconnected phase voltage under different transition resistances

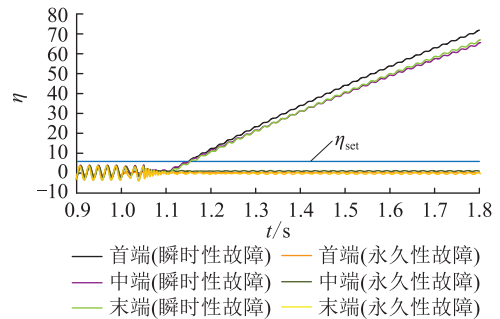
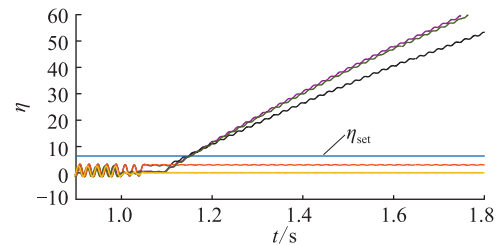


图 13 不同故障点位置下断开相电压积分值

Fig.13 Integral value of disconnected phase voltage at different fault point positions



— 未换相失败(瞬时性故障) — 2次连续换相失败(瞬时性故障)
— 未换相失败(永久性故障) — 2次连续换相失败(永久性故障)
— 多次换相失败(瞬时性故障) — 多次换相失败(永久性故障)

图 14 不同换相失败工况下断开相电压积分值

Fig.14 Integral value of disconnected phase voltage under different commutation failure conditions

由图 12 可知, 经 300 Ω 大过渡电阻接地时, 瞬时性故障的时域电压积分值有一定幅度的降低但远远达不到整定值, 所提判据仍然具有高度可靠性。由图 13 可知, 故障发生在线路首端、中端、末端时故障相时域电压积分值均远大于整定值, 因此,

故障位置的不同并不影响所提判据识别故障性质。由图 14 可知,未发生换相失败时积分值有一定的降低,但远大于整定值,故所提判据不受换相失败的影响且适用于直流未发生换相失败的正常运行状态及发生换相失败的故障状态。

利用 Matlab 对不同故障位置、不同过渡电阻、不同换相失败工况的断开相时域电压进行积分运算,验证判据的正确性,故障时长为 0.1 s,判定时长为 0.5 s,验证结果见表 2。

表 2 文中判据验证结果
Table 2 Proposed criterion verification results

换相失败类型	短路位置	过渡电阻/ Ω	η	是否大于 η_{set}	故障性质
2 次连续换相失败	10%	0	37.96	是	瞬时
	10%	100	34.14	是	瞬时
多次换相失败	10%	0	36.48	是	瞬时
	10%	100	33.91	是	瞬时
未发生换相失败	90%	200	30.63	是	瞬时
	90%	300	29.75	是	瞬时

验证结果表明,故障识别积分算法不受换相失败、故障点位置、过渡电阻影响,2 种不同故障性质下,积分结果具有很大的差异性,故能够准确识别故障性质,具有很强的适用性。

5 结论

文中针对直流换相失败影响下不带并联电抗器的交流线路进行分析,得出传统单相重合闸判据不适用于交直流混联系统的结论。根据推导出的不同故障性质下断开相时域电压表达式,得知瞬时性故障和永久性故障的断开相时域电压波形具有明显差异,据此提出基于故障相时域电压波形的积分判据。文中所提判据在换相失败发生时、未发生时均能适用,耐过渡电阻能力良好,算法实现简单,易适用于工程实际,为考虑换相失败影响的单相故障性质判别提供了有效解决途径。

参考文献:

[1] 饶宏,冷祥彪,潘雅娴,等. 全球直流输电发展分析及国际化拓展建议[J]. 南方电网技术,2019,13(10):1-7.
RAO Hong, LENG Xiangbiao, PAN Yaxian, et al. Analysis of the global HVDC power transmission development and the suggestion of the HVDC export[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 1-7.

[2] 刘垚,孔力,邓卫,等. 交直流混联系统稳定性分析研究综述[J]. 电工电能新技术,2020,39(9):36-47.
LIU Yao, KONG Li, DENG Wei, et al. Review of stability analysis for AC/DC hybrid power systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(9): 36-47.

[3] 侯俊杰,宋国兵,徐瑞东,等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(14):176-187.
HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.

[4] 董新洲,汤涌,卜广全,等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报,2019(11):3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019(11): 3107-3119.

[5] 刘雨珊,李凤婷. 直流馈入影响下交流输电线路的纵联保护方案[J]. 科学技术与工程,2021,21(27):11642-11649.
LIU Yushan, LI Fengting. Pilot protection scheme for alternating current transmission lines under the influence of direct current feed-in [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11642-11649.

[6] 任莹,王宾,俞斌,等. LCC-HVDC 逆变侧换流站近区交流线路高阻接地故障保护[J]. 电力系统自动化,2021,45(23):162-169.
REN Xuan, WANG Bin, YU Bin, et al. High resistance grounding fault protection of AC line near converter station at inverter side of LCC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 162-169.

[7] 赵盛,李博通,李斌,等. 单相跳闸对换相过程的影响机理及连续换相失败抑制方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):17-24,55.
ZHAO Sheng, LI Botong, LI Bin, et al. Influence mechanism of single-phase tripping on commutation process and suppression strategy of continuous commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 17-24, 55.

[8] 李欢,赵晓斌,杨煜. 高压直流工程熄弧角测量异常引发换相失败故障的分析与处理[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):214-218.
LI Huan, ZHAO Xiaobin, YANG Yu. Analysis and treatment of commutation failure caused by abnormal extinction angle in HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 214-218.

[9] 罗勋华,黄纯,江亚群,等. 基于电压内积的带并联电抗器输电线路单相自适应重合闸[J]. 电工技术学报,2017,32(11):17-25.
LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A voltage inner product based approach for single-phase adaptive reclosure on transmission line with shunt reactors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 17-25.

[10] 李博通,赵盛,李斌,等. 基于电弧电流边际谱能量比的输电线路永久性故障识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(10):61-67.
LI Botong, ZHAO Sheng, LI Bin, et al. Permanent fault identification method for transmission line based on marginal spectral

- energy ratio of arc current[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018,30(10):61-67.
- [11] 周超,黄纯,江亚群,等. 基于改进 ITD 边际谱熵的单相自适应重合闸[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(10):24-30.
- ZHOU Chao,HUANG Chun,JIANG Yaqun,et al. Single-phase adaptive reclosure based on marginal spectrum entropy using improved ITD[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(10):24-30.
- [12] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报,1984,18(2):23-31.
- GE Yaozhong. Method of distinguishing between instant and permanent faults during automatic single-phase reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984,18(2):23-31.
- [13] 李斌,郭子焯,姚斌,等. 基于电压相位波动特征的单相永久性故障识别方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):9-16.
- LI Bin, GUO Zixuan, YAO Bin, et al. Identification of single phase permanent fault based on voltage phase fluctuation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):9-16.
- [14] 罗勋华,黄纯,戴永梁,等. 输电线路瞬时性故障的恢复电压直流偏移特性研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):107-111.
- LUO Xunhua,HUANG Chun,DAI Yongliang,et al. DC offset characteristics of recovery voltage for transient transmission line fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):107-111.
- [15] 解超,李凤婷,王宾,等. 基于功率比的带并补电抗风电送出线自适应单相重合闸策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):196-201.
- XIE Chao,LI Fengting,WANG Bin,et al. An adaptive single-phase reclosing scheme based on power ratio for wind power outgoing line with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):196-201.
- [16] 张宇辉,吴家明,武东斌,等. 基于 MFDFA 的超高压线路单相自适应重合闸拍频新判据[J]. 电工电能新技术,2016,35(3):34-40.
- ZHANG Yuhui,WU Jiaming,WU Dongbin,et al. New beat-frequency criterion for single-phase adaptive reclosure in EHV transmission lines based on MFDFA[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(3):34-40.
- [17] 宋国兵,黄兴华,徐海洋,等. 带并联电抗器输电线路三相跳闸后的模电流频率分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):155-161.
- SONG Guobing,HUANG Xinghua,XU Haiyang,et al. Analysis of mode current frequency after three-phase trip for transmission lines with shunt reactors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):155-161.
- [18] 李永丽,杨子荷,宋金钊,等. HVDC 馈入及其换相失败对交流电网选相元件的影响分析[J]. 电网技术,2020,44(5):1825-1834.
- LI Yongli,YANG Zihe,SONG Jinzhao,et al. Influence analysis of HVDC and commutation failure on AC phase selector[J]. Power System Technology, 2020, 44(5):1825-1834.
- [19] 于灿平. 弱送端电网直流群同时换相失败对电网功角稳定特性的影响研究[J]. 浙江电力,2019,38(5):55-61.
- YU Canping. Research on the stability mechanism under simultaneous commutation failure of UHVDC group in the weak sending end grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5):55-61.
- [20] 张润峰. 交直流互联电网自适应重合闸研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
- ZHANG Runfeng. Research on adaptive reclosing of AC and DC interconnected power grid[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2018.
- [21] 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.
- [22] 邵文权,刘朋跃,王斌,等. 基于等值阻抗相位特征的带并补电抗线路单相自适应重合闸故障识别方法[J]. 电网技术,2020,44(5):1796-1805.
- SHAO Wenquan,LIU Pengyue,WANG Bin,et al. Single-phase adaptive reclosure fault identification for transmission lines with shunt reactors based on equivalent impedance phase property[J]. Power System Technology, 2020, 44(5):1796-1805.
- [23] 宋金钊,李永丽,张云柯,等. 逆变侧交流线路单相自适应重合闸的适用性分析与改进策略[J]. 高电压技术,2022,48(3):1001-1010.
- SONG Jinzhao,LI Yongli,ZHANG Yunke,et al. Applicability analysis and improved strategy of adaptive single-phase reclosure for AC lines on inverter side[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3):1001-1010.
- [24] 徐泉洲,李永丽,宋金钊,等. 含直流馈入的带并补电抗线路单相自适应重合闸适用性分析及故障识别方法[J]. 高电压技术,2022,48(4):1442-1451.
- XU Quanzhou,LI Yongli,SONG Jinzhao,et al. The single-phase adaptive reclosure applicability analysis and fault identification method of transmission lines with shunt reactors including DC infeed[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4):1442-1451.
- [25] 周博昊,李凤婷,尹纯亚. 高压直流输电系统后续换相失败风险评估及抑制方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(5):143-151.
- ZHOU Bohao,LI Fengting,YIN Chunya. Risk evaluation and suppression methods for subsequent commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5):143-151.
- [26] 尹纯亚,李凤婷,陈伟伟,等. 单极闭锁引起直流健全极换相失败分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):114-

119,132.

YIN Chunya, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Commutation failure risk analysis of sound pole caused by DC monopole blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11):114-119,132.

[27] 王思超, 文俊, 贺冬珊, 等. 受端分层 UHVDC 换相失败控制和恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 172-179.

WANG Sichao, WEN Jun, HE Dongshan, et al. Commutation failure control and recovery strategy of UHVDC with hierarchical connection mode[J]. Power System Protection and Con-

trol, 2020, 48(2): 172-179.

作者简介:



李凤婷

李凤婷(1965),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为可再生能源并网技术与电力系统保护(E-mail:xjlf2009@sina.com);

刘雨姗(1997),女,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

解超(1987),男,博士,副教授,研究方向为可再生能源并网技术与电力系统保护。

Criterion of single-phase fault nature of AC line considering the influence of commutation failure

LI Fengting¹, LIU Yushan¹, XIE Chao¹, LIU Jianxun¹, HUANG Fei²

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji Power Supply Company, Changji 831100, China)

Abstract: The amplitude of AC line current at the inverter side is affected by DC commutation failure and fluctuates for a short time after single-phase trip. The fluctuation range increases with the increase of the number of DC commutation failures, resulting in the misjudgment of the traditional single-phase fault nature criterion based on the amplitude of the recovery voltage. To solve this problem, a transmission line fault equivalence model is built firstly to evaluate the impact of DC commutation failure on the sound phase voltage. Then the time domain expressions are derived for the disconnected phase voltage during the recovery voltage stage for different fault nature. After that, a single-phase fault nature identification criterion based on time domain voltage integration is proposed, and its effectiveness is verified by PSCAD/EMTDC simulation. The results show that the proposed method has good resistance to transition resistance and DC interference, and the fault nature identification criterion is suitable for DC commutation failure.

Keywords: single-phase trip; commutation failure; recovery voltage amplitude; sound phase voltage; time domain voltage; single-phase fault nature judgment

(编辑 方晶)