

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200054

考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析

王璐¹, 李凤婷¹, 尹纯亚¹, 辛超山²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 目前高压直流输电系统逆变侧发生不对称故障时, 采用最小关断角判别法判别换相失败, 其研究仅考虑电压因素, 预测效果不理想。针对此问题, 通过对换相失败机理和影响因素的分析, 认为直流电流上升与交流电压下降均会使关断角减小, 将直流电流与交流电压解耦, 得到一个仅含电压变化率的逆变侧关断角表达式作为判据。该判据可依据对直流线路和逆变侧相关运行参数的计算得出导致换相失败的临界电压变化率值。在换相过程中, 当系统电压变化率小于临界电压变化率时, 系统存在较大换相失败风险。基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建 CIGRE HVDC 模型, 对不同过渡电阻的单相接地故障进行仿真测试, 结果验证了所提方法的正确性。

关键词: 高压直流输电; 不对称故障; 换相失败; 直流电流变化; 电压变化率

Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation

WANG Lu¹, LI Fengting¹, YIN Chunya¹, XIN Chaoshan²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China

2. Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: At present, when an asymmetric fault occurs on the inverter side of an HVDC transmission system, prediction is not that effective using the minimum turn-off angle discrimination method, which only considers the voltage factor. To solve this problem, based on the analysis of the mechanism and the influencing factors of commutation failure, it is shown that both the rise of DC current and the reduction of AC voltage can make the turn-off angle decrease. Therefore, by decoupling the DC current and the AC voltage, an expression of the inverter side turn-off angle only related to the changing rate of voltage is obtained. This is taken as the criterion. This criterion can be used to calculate the critical voltage changing rate that leads to commutation failure based on the operational parameters of the DC line and the inverter side. In the process of commutation, when the changing rate of the system voltage is less than that of the critical voltage, the system has a greater risk of commutation failure. A CIGRE HVDC model is built based on the PSCAD/EMTDC software, and the simulation experiments of single phase ground fault with different transition resistance are carried out. The test results verify the validity of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877185).

Key words: HVDC transmission; asymmetrical fault; commutation failure; DC current variation; voltage rate

0 引言

高压直流输电在远距离大容量输电和大区域电网互联中发挥着越来越重要的作用^[1-4]。而逆变侧换相失败是高压直流输电系统中最普遍的故障之一^[5]。当直流系统发生换相失败时, 若直流系统在扰动后不能迅速恢复则会产生交流过电压, 从而导致受端交流系统振荡或失去稳定, 进而引发机组脱网、甩负荷等, 严重威胁着电网安全^[6-8], 因此对换相失败

的正确判断和预防具有重要工程意义。

对于交流系统发生故障所引起的直流系统换相失败, 现有的研究表明: 逆变侧发生换相失败的根本原因是换流阀的关断角过小^[9]。关断角的大小又与交流电压、直流电流、超前触发角、过零点偏移角度等有关^[10-12]。当交流系统发生不对称故障时, 关断角还与电压过零点前移角度有关^[13-15]。目前对于换相失败的研究主要包括换相失败的判别、换相失败影响因素和换相失败控制策略等几个方面。

文献[16]提出逆变侧换相失败的影响因素有三方面, 其中一方面是单一直流的影响因素, 包括熄

弧角、换流母线电压、直流电流等电气量；文献[17]通过对整流侧和逆变侧换相失败的分析给出了三相电压不对称时实际关断角的计算方法，但其计算方法过于复杂，需要实时采集实际电压过零点和换流阀换相角等的瞬时值，对系统通信和计算能力要求较高。文献[18]提出的采用阀电压持续为零或阀电流持续非零的换相失败判据存在盲区。文献[19]将直流电压与直流电流解耦，得到一个关断角只与交流线电压有关的表达式用于判断系统是否发生换相失败，但该判据只适用于三相对称故障具有一定的局限性。

本文针对以上问题，首先分析了不对称故障下换相失败机理与影响因素，同时考虑了交流电压与直流电流的变化对换相失败的影响，在经典关断角的基础上，结合直流线路和逆变侧相关运行参数，建立了换相失败分析数学模型并提出了相应换相失败判据。该判据能够有效提高换相失败的判别准确性。最后利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建 CIGRE HVDC 模型进行仿真测试，其测试结果验证了所提结果的准确性和有效性。

1 换相失败机理分析

1.1 换相过程分析

在正常工作情况下逆变器各换流阀的导通及关断顺序如图 1 所示。

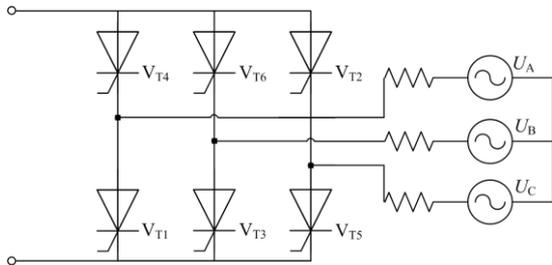


图 1 6 脉动逆变器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of 6-pulse inverter

工作过程以 V_{T1} 向 V_{T3} 换相为例加以说明，对于晶闸管 V_{T1} ，当三相电压中 A 相电压高于其他两相电压时，管 V_{T1} 阳极电位高于其阴极电位，且高于 V_{T3} 、 V_{T5} 的阳极电位，根据晶闸管导通条件可知当晶闸管承受正向电压，且仅在门极有触发信号时晶闸管便能开通，此时给晶闸管 V_{T1} 加门极触发脉冲，则 V_{T1} 导通，管 V_{T3} 、 V_{T5} 处于截止状态；经过一段时间当 V_{T3} 上的 B 相电压高于其他两相电压时，给 V_{T3} 施加触发信号，则 V_{T3} 导通，此时 V_{T1} 承受相应的反向电压关断，从而实现了两晶闸管之间的换相。

1.2 换相失败机理分析

换相失败的根本原因是：对于两个预定换相的晶闸管，其预定关断的晶闸管需要承受一定时间的反向电压，在此期间若该晶闸管未能恢复阻断能力，或者两个晶闸管的换相过程未能结束，则承受反向电压的晶闸管将会承受正向电压，被换相的阀会向原先预定关断的阀发生倒换相^[20]。

γ 为逆变侧晶闸管所承受的关断时间 t_q 折合的电角度^[21]。晶闸管的恢复时间约 $400 \mu s$ ，则用电角度 γ_{min} 表示约为 7.2° ，当晶闸管的关断角小于最小关断角 γ_{min} 时，逆变器会发生换相失败。

换相过程持续时间折合成电角度用 μ 表示，称之为换相重叠角，在逆变侧换流器运行中也是极为重要的一个参数，可用式(1)表示。

$$\mu = \arccos\left(\cos \gamma + \frac{\sqrt{2}k_1 I_d X_{Cl}}{U_{Li}}\right) - \gamma \quad (1)$$

式中： k_1 为换流变压器变比； I_d 为直流电流； X_{Cl} 为逆变侧换相电抗； U_{Li} 为逆变侧换流母线电压。

1.3 换相失败影响因素分析

在逆变侧换流阀换相过程中，关断角 γ 、触发角 β 和换相重叠角 μ 三者具备如式(2)的数学关系^[22]。

$$\gamma = \beta - \mu \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得经典关断角表达式^[23]。

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}k_1 I_d X_{Cl}}{U_{Li}} + \cos \beta\right) \quad (3)$$

由式(3)可知直流电流的增大、逆变侧换流母线电压的减小都会导致逆变侧换流器关断角减小而引起换相失败。如图 2、图 3 所示。

从图 2 和图 3 中可看出随着直流电流的升高或换流母线电压的降低，关断角均会持续下降，这与本文理论分析吻合；图 2、图 3 仅分别讨论了单一直流电流或单一换流母线电压与关断角的响应特性，但在实际运行中两者会同时影响关断角的下降，继而增大发生换相失败的概率，因此本文提出了考虑直流电流上升的换相失败判据。

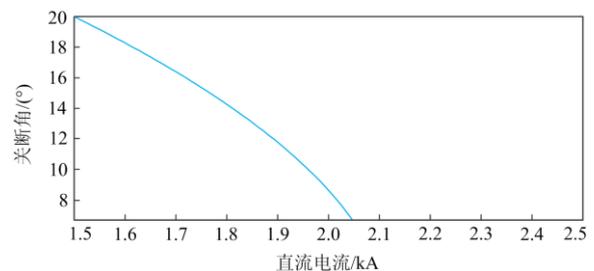


图 2 关断角与直流电流的响应特性

Fig. 2 Off angle and DC current response characteristics

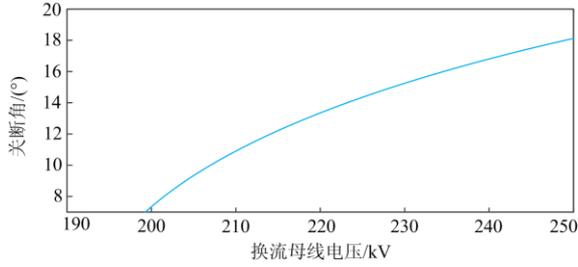


图3 关断角与换流母线电压的响应特性

Fig. 3 Response characteristics of turn-off angle and converter bus voltage

2 不对称故障下换相失败分析

式(3)仅适用于三相对称故障,但当交流系统发生不对称故障时,会造成交流电压的电压过零点前移一个角度 φ ,因此将电压过零点前移角度 φ 作为修正量代入式(3)得。

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}k_1 I_d X_{Cl}}{U_{Li}} + \cos\beta\right) - \varphi \quad (4)$$

设换流母线线电压为 U_L ,三相电压表达式为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_A \cos(\omega t) \\ \dot{U}_B = U_B \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \dot{U}_C = U_C \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

设在逆变侧交流系统发生单相(A相)接地故障后,A相故障时电压变化率为 ΔU_A^* ,其换相电压前移角度为 φ ,健全相B、C的电压不变,此时阀侧换流母线线电压的向量图如图4所示。

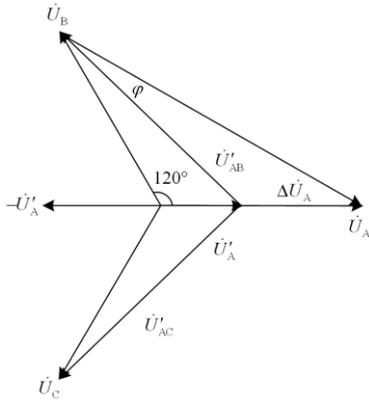


图4 阀侧换流母线线电压向量图

Fig. 4 Voltage vector diagram of valve side converter bus

由图4根据正弦定理可求得换相电压前移角度 φ 为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta U_A^*}{2\sqrt{3} - \sqrt{3}\Delta U_A^*}\right) \quad (6)$$

则不对称故障时关断角 γ 为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}k_1 I_d X_{Cl}}{U_{Li}} + \cos\beta\right) - \arctan\left(\frac{\Delta U_A^*}{2\sqrt{3} - \sqrt{3}\Delta U_A^*}\right) \quad (7)$$

由式(7)可以看出,交流系统电压的下降与直流电流的增大均会使关断角的减小,因此需进一步将交流电压和直流电流的函数关系解耦,消去直流电流,得到一个仅与电压变化率有关的逆变侧关断角表达式。

图5中直流电流与整流侧电压和逆变侧电压的函数关系为

$$I_d = \frac{U_{dor} \cos\alpha_r - U_{doi} \cos\gamma}{R_{cr} + R_d - R_{ci}} \quad (8)$$

式中: U_{dor} 和 U_{doi} 分别为整流侧和逆变侧换流变压器的阀侧空载电压,且 $U_{dor} = (3\sqrt{2}/\pi)NU_{LR}$, $U_{doi} = (3\sqrt{2}/\pi)NU_{Li}$; α_r 和 γ 分别为整流侧和逆变侧触发控制角; R_{cr} 和 R_{ci} 分别为整流侧和逆变侧的换相电阻; R_d 为直流输电线路上的电阻。

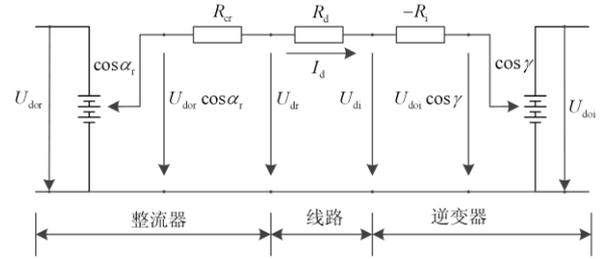


图5 高压直流输电系统等值电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of HVDC transmission system

当系统发生单相(A相)接地故障后A相与B相、A相与C相间的线电压为

$$\dot{U}_{AC} = \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B \quad (9)$$

由图4根据余弦定理可得:

$$|\dot{U}_{AC}| = |\dot{U}_{AB}| = \sqrt{|\dot{U}_A|^2 + |\dot{U}_B|^2 - 2|\dot{U}_A||\dot{U}_B|\cos 120^\circ} \quad (10)$$

当系统正常运行时有 $|\dot{U}_A| = |\dot{U}_B| = |\dot{U}_C|$,故障时由图4可得:

$$|\dot{U}_A| = |\dot{U}_B| = |\dot{U}_C| = |\Delta \dot{U}_A| + |\dot{U}_A| \quad (11)$$

则由式(10)与式(11)可得:

$$U'_{AC} = U'_{AB} = \sqrt{3U_A^2 - 3\Delta U_A U_A + \Delta U_A^2} \quad (12)$$

逆变侧电源为星形,则:

$$U_{AC} = U_{AB} = \sqrt{3}U_A \quad (13)$$

则式(10)的标幺值形式为

$$U_{Li}^* = U_{AC}^* = U_{AB}^* = \sqrt{1 - \Delta U_A^* + \frac{\Delta U_A^{*2}}{3}} \quad (14)$$

将式(8)和式(12)代入式(7)中得

$$\gamma = \arccos\left(\frac{A}{U_{LI}^*} + \frac{\cos \beta}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) + \arctan \frac{a}{b} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \frac{\sqrt{2}K_I X_{CI} U_{dor} \cos \alpha_r}{(R_{cr} + R_d - R_{ci})U_{LIN} \sqrt{a^2 + b^2}} \\ a = -\sin \varphi \\ b = \cos \varphi + \frac{\sqrt{2}K_I X_{CI} U_{doi}}{U_{LIN} (R_{cr} + R_d - R_{ci})} \end{cases} \quad (16)$$

从式(7)可以看出直流电流与交流电压的变化均会影响关断角 γ ，因此通过式(8)~式(14)将交流电压与直流电流解耦得到一个仅含有电压变化率的关断角表达式(式(15))。

本文研究的重点是当交流系统发生不对称故障时 γ 的响应，正常工况下逆变侧不会发出指令，只有当逆变侧电压下降到一定程度时，逆变侧才会向整流侧发出限流指令。而通常情况换相失败往往发生在故障发生的初始时刻，此时逆变侧的限流指令传输到整流侧逆变器会有一定的时延，当换相失败发生时，整流侧通过比例-积分(PI)控制器实现定电流控制也会有一定的时延，因此认为 α_r 是不变的，通过式(2)可看出， β 随 γ 的变化而变化，当 γ 保持不变时， β 也被认为是不变的，则式(15)只包含 γ 与电压变化率 ΔU_A^* 两个变量。从理论上可直观地得出关断角 γ 随电压变化率 ΔU_A^* 的变化而变化，此判据兼顾交流电压与直流电流的变化，从而减小误差，实现更为准确的换相失败预测。

3 CIGRE 标准模型仿真分析

本文采用 CIGRE 高压直流标准测试系统^[24]作为模型进行分析，如附录 A 图 A1 所示。

若该系统初始时在额定状态下运行，其相关运行参数为：逆变侧换流母线电压 $U_{LI}=209.2288$ kV，逆变侧变压器变比 $K_I=1.099$ ，整流侧、逆变侧换流变压器的阀侧空载电压分别为 $U_{dor}=582.32$ kV， $U_{doi}=555.16$ kV，整流侧触发控制角 $\alpha_r=20^\circ$ ，整流侧换相电阻 $R_{cr}=12.96 \Omega$ ，逆变侧换相电抗 $X_{CI}=13.32 \Omega$ ，逆变侧换相电阻 $R_{ci}=12.72 \Omega$ ，逆变侧超前触发角 $\beta_i=38.3^\circ$ ，直流电阻 $R_d=5 \Omega$ 。

将 CIGRE 模型参数分别代入式(7)与式(15)，可得单相接地故障下关断角对电压变化率的响应特性，如图 6 所示。不考虑直流电流上升，由式(7)计算可得电压变化率变化到 0.51 左右会发生换相失败，因为式(7)仅考虑了交流电压的影响，使得计算

结果精度较低。而对于兼顾直流电流与交流电压的影响，由式(15)计算得到电压变化率变化到 0.11 左右，系统发生换相失败。

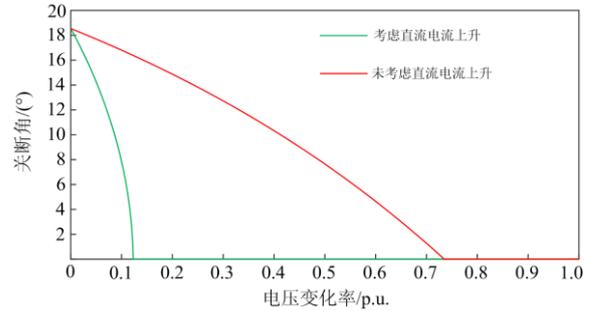


图 6 关断角与电压变化率的响应特性

Fig. 6 Response characteristics of off angle and voltage change rate

在 CIGRE 模型中设置单相(A 相)接地故障，故障电阻为 50Ω ，故障时间为 1.3 s 并持续 0.05 s，此时系统响应如图 7 所示。由图可知，系统在 1.3035 s 左右发生换相失败，此时关断角持续下降至 0° ，直流电流上升，逆变侧换流母线电压为 0.8903(标幺值)，则对应电压变化率为 0.1097，若使用常规基于交流侧电压判据，不考虑直流电流上升影响，按照式(7)判据，当电压变化率变化到 0.51 时，系统会发生换相失败，这与仿真结果误差大，因此精度低；而按照本文兼顾直流电流上升与交流电压下降的判据，可看出其与仿真结果误差小，精度高，因此更加准确。

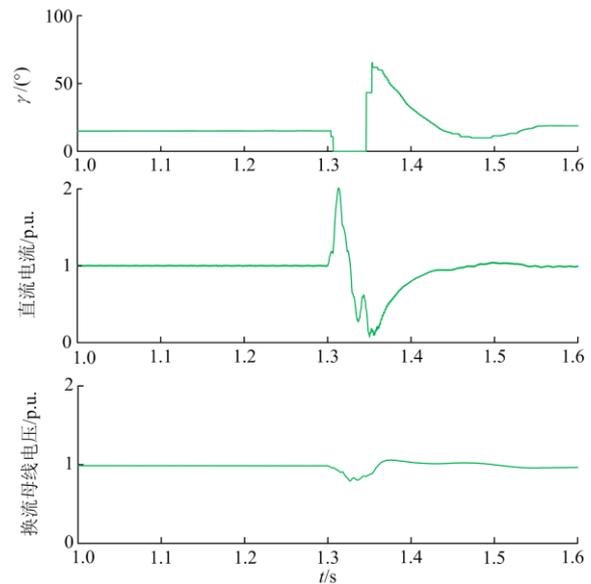


图 7 50 Ω 故障电阻下逆变侧系统响应

Fig. 7 Inverter side system response under 50 Ω fault resistance

为进一步证明本文的精确度与所提方法的正确性, 基于 CIGRE 高压直流标准测试系统, 结合短路阻抗的实际变化范围, 在不同故障电阻下设置单相接地故障, 故障相为 A 相, 使得关断角下降至换相失败临界值 7.2° 时结果如表 1 所示。

表 1 不同故障电阻下换相失败时 U_{ac} 的值

Table 1 Value of U_{ac} when commutation fails with different fault resistance

故障起始 时间/s	故障 电阻/ Ω	换相失败 发生时刻/s	换相失败 发生时 U_{ac} /kV	电压变化率 ΔU_A
1.3	100	1.305 0	0.886 7	0.113 3
1.3	110	1.303 5	0.897 4	0.105 9
1.3	115	1.303 6	0.901 5	0.098 5
1.3	118	1.303 4	0.893 7	0.106 3
1.3	130	—	—	—

注: —为未发生换相失败

由表 1 可知, 对于未考虑直流电流上升的换相失败判据表明, 当电压变化率变化到 0.517 8 时会发生换相失败, 这与表 1 计算结果有较大误差, 本文考虑直流电流上升的电压变化率判据, 当电压变化率变化到 0.11 左右会发生换相失败, 这与表 1 计算结果误差较小, 从而验证使用电压变化率判据的正确性。

在不对称故障情况下, 单相接地故障既会导致电压幅值下降也会导致直流电流上升, 因而在未考虑直流电流上升的分析中可能导致换相失败的漏判, 使分析结果偏于乐观, 故而式(7)计算结果与实验结果表 1 误差较大。本文使用电压变化率判据, 既考虑了电压幅值的下降因素也考虑了直流电流上升的因素, 从而推导出式(15), 因而可以提高不对称故障对换相失败情况判别的准确度, 表 1 的实验结果也进一步证明本文判据的精确度。

设置不同的短路故障, 通过改变短路阻抗使得关断角下降到换相失败时的 7.2° , 即换相失败时关断角临界值, 并设置故障时间为 1.3 s, 得到如图 8、图 9 所示的不同阻抗下的直流电流和换流母线电压的响应。从图中可看出, 当短路阻抗设为 118Ω 时, 换流母线电压在 1.3 s 之后急速下降至 0, 直流电流在 1.3 s 之后开始上升, 可知发生了换相失败, 从图中还可看出在发生换相失败发生后的 0.05 s 左右, 电压下降到 0.886(标幺值)左右, 其相应的电压变化率 ΔU_A^* 在 0.114 左右, 这与本文所提理论值在考虑直流电流上升的电压变化率 ΔU_A^* 下降到 0.11 左右会发生换相失败相差不多。当短路阻抗设置为 130Ω 时, 直流电流并未骤升, 换流母线电压也并未下降

到 0, 表明未发生换相失败, 这与表 1 数据一致。

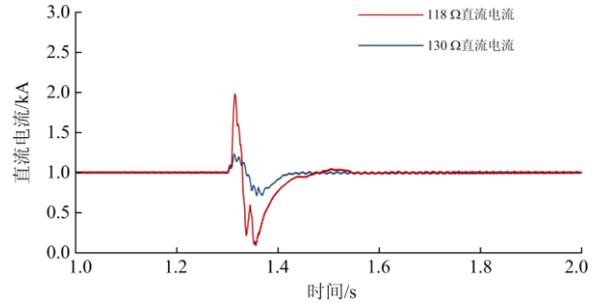


图 8 不同阻抗下直流电流响应

Fig. 8 DC current response under different impedance

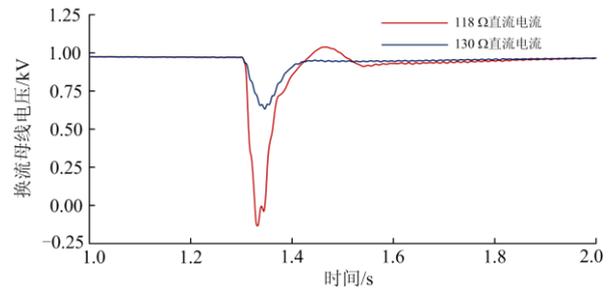


图 9 不同阻抗下换流母线电压响应

Fig. 9 Voltage response of converter bus under different impedance

4 结论

直流系统换相过程及影响因素很复杂, 例如交流电压上升、关断角裕度、谐波等均会影响换相过程。本文重点研究了不对称故障下考虑直流电流上升的电压变化率对换相失败的影响, 并推导出能够适用于不对称故障下考虑直流电流的换相失败判据, 该判据能够有效提高换相失败的判别准确性, 通过本文的研究, 得出主要结论如下:

(1) 当交流系统发生不对称故障时(以单相接地故障为例), 交流电压会迅速降至零, 但同时直流电流也会随即上升, 且两者均会影响关断角的大小, 因此通过高压直流输电线路等效电路图, 将直流电流与交流电压解耦, 得到一个仅与电压变化率有关的关断角表达式, 并根据直流线路和逆变侧相关运行参数计算得出临界电压变化率 ΔU_A^* 为 0.11, 当系统电压变化率小于临界电压变化率时, 即认为系统发生换相失败。

(2) 采用 CIGRE 标准测试系统作为模型进行分析, 所得仿真结果与本文理论分析结果吻合。

(3) 随着高压直流输电线路的高速发展, 换相失败作为高压直流输电线路上的主要故障之一, 进一步抑制甚至彻底解决换相失败问题成为当今研究热点, 本文提出的考虑直流电流变化的 HVDC 系统不

对称故障换相失败分析也为抑制换相失败提供了新方法。换相失败的准确预测、新型抑制方法等将是未来值得探索的研究方向。

附录 A

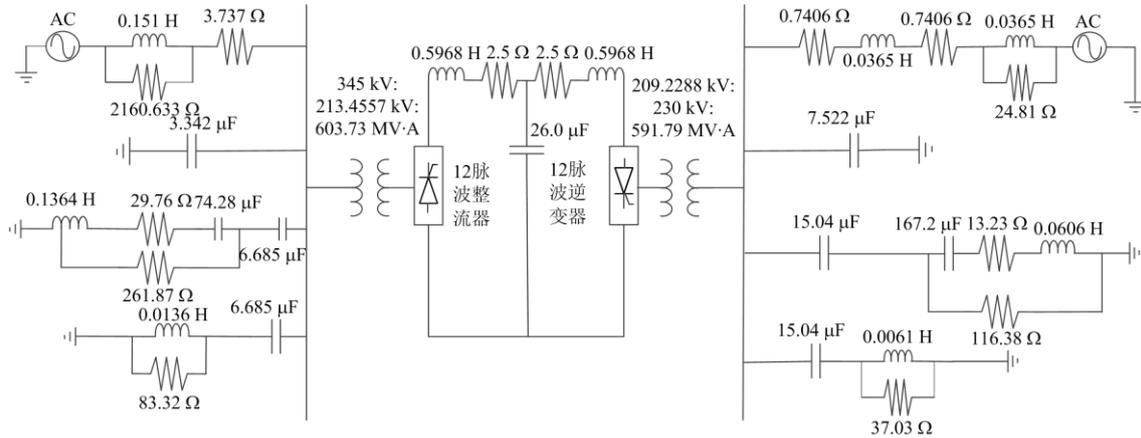


图 A1 CIGRE 高压直流标准测试系统

Fig. A1 CIGRE HVDC standard test system

参考文献

[1] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.

[2] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 杭州: 浙江大学出版, 1982.

[3] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[4] 李程昊, 刘畅, 张振安, 等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 56-63, 76.
LI Chenghao, LIU Chang, ZHANG Zhen'an, et al. Analysis of commutation failure in HVDC power transmission system considering prediction control of commutation failure and initial fault angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 56-63, 76.

[5] 孟庆强, 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.

[6] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.

[7] 舒展, 张伟晨, 王光, 等. 特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 163-170.
SHU Zhan, ZHANG Weichen, WANG Guang, et al. Fault analysis and its countermeasures of Jiangxi Provincial Grid after UHVDC line connection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 163-170.

[8] YANG W. Study on system commissioning test and project application of Lingzhou to Shaoxing UHVDC transmission project[J]. Journal of Engineering, 2017(13): 2188-2192.

[9] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 964-957.

[10] WEI Zhinong, YUAN Yang, LEI Xiao, et al. Direct-current predictive control strategy for inhibiting commutation failure in HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2409-2417.

[11] 刘颖, 戴栋, 汪娟娟, 等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.
LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.

- [12] 曾亮, 李永丽, 张云柯, 等. 逆变侧交流系统不对称故障引发HVDC系统连续换相失败的机理及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3159-3168.
ZENG Liang, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Research on mechanism and control strategy of continuous commutation failures in HVDC system caused by asymmetrical fault in inverter-side AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3159-3168.
- [13] 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, 25.
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, 25.
- [14] 李江涛, 顾悦, 任子媛, 等. 交流不对称故障类型对HVDC换相失败的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 131-137.
LI Jiangtao, GU Yue, REN Ziyuan, et al. Influence of AC system asymmetric Fault on the HVDC system commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 131-137.
- [15] 张彦涛, 邱丽萍, 施浩波, 等. 考虑不对称故障影响的多馈入直流系统换相失败快速判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4759-4767, 4980.
ZHANG Yantao, QIU Liping, SHI Haobo, et al. Fast detection method of commutation failure in multi infeed DC system considering the effect of unbalanced fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4759-4767, 4980.
- [16] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513, 647.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513, 647.
- [17] 吴红斌, 丁明, 刘波. 交直流系统暂态仿真中换流器的换相过程分析[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 11-14.
WU Hongbin, DING Ming, LIU Bo. Analysis on commutation process of converters in transient simulation of hybrid AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 11-14.
- [18] 邹亮, 刘涛, 赵彤, 等. 基于阀电压或阀电流的HVDC换相失败故障诊断[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3453-3458.
ZOU Liang, LIU Tao, ZHAO Tong, et al. Diagnosis of commutation failure in HVDC transmission systems based on voltage or current of converter valve[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3453-3458.
- [19] 王峰, 刘天琪, 李兴源, 等. 考虑直流电流上升及交流电压下降速度的换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 111-117.
WANG Feng, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Commutation failure analysis considering DC current rise and AC voltage drop speed[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 111-117.
- [20] 蔡文瑞, 杨国生, 杜丁香, 等. 考虑多因素影响的换相失败预测与识别方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3477-3487.
CAI Wenrui, YANG Guosheng, DU Dingxiang, et al. Prediction and identification method for commutation failure considering multi-factor influence[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3477-3487.
- [21] 饶宇飞, 张鹏辉, 李程昊, 等. 励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 54-61.
RAO Yufei, ZHANG Penghui, LI Chenghao, et al. Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 54-61.
- [22] 尹纯亚, 李凤婷, 张增强, 等. 直流闭锁引发多馈出直流系统换相失败分析[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2019, 36(2): 138-145.
YIN Chunya, LI Fengting, ZHANG Zengqiang, et al. Commutation failure analysis of multi-outfeed HVDC system caused by DC blocking[J]. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2019, 36(2): 138-145.
- [23] 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.
- [24] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C] // Proceedings of International Conference on AC and DC Power Transmission, 1991, London, UK: 374-378.

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-03-20

作者简介:

王璐(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电系统稳定性分析; E-mail: 1589292004@qq.com

李凤婷(1965—), 女, 通信作者, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: xjft2009@sina.com

(编辑 姜新丽)