

对称故障下基于直流电流变化的后续换相失败 风险预判及风险等级划分

王 玉,刘福锁,雷 杰,侯玉强,吴雪莲,李 威
(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:在换流母线的不稳定电压作用下,高压直流输电系统发生多次换相失败造成的多次功率冲击对电网安全稳定运行影响很大。根据交直流系统实时运行状态对后续换相失败的风险进行预判是工程中迫切需要解决的问题。分析了高压直流输电系统换相失败的基本过程,根据高压直流输电系统准稳态方程推导了逆变侧关断角与直流电流变化的关系,提出一种基于直流电流变化的后续换相失败风险预判方法。选定前次换相失败后关断角重新恢复至参考值的时刻作为预判时刻,通过预估交流电压变化范围评估导致发生后续换相失败对应的直流电流上升区间,划分高压直流输电系统发生后续换相失败的风险等级,再根据预判时刻的直流电流大小确定发生后续换相失败的风险等级。通过PSCAD仿真软件中的Cigre高压直流标准测试模型,验证了所提方法的有效性。

关键词:高压直流输电系统;后续换相失败;风险预判;风险等级划分;量化评估

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107002

0 引言

我国跨区直流输电规模不断扩大、单回直流输电容量不断增长,交直流耦合特性日益凸显,直流输电系统换相失败成为制约交直流电网安全稳定运行的重要因素之一。换相失败是半控型晶闸管的一种特殊运行状态,当换相过程刚结束时,若退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内未恢复阻断能力,或换相过程未结束,电压转向后,被换相的阀将向预退出导通的阀倒换相,该过程被称为换相失败^[1-3]。在触发脉冲丢失、交流故障等场景下可能引发直流输电系统换相失败。本文的研究聚焦于交流对称故障引发的换相失败问题。直流输电系统换相失败产生的巨大功率冲击,将会给电网稳定运行带来影响,尤其是在换流母线不稳定电压作用下,直流系统无法快速从换相失败中恢复而引起的多次功率冲击,会威胁电网的安全稳定运行^[4-6]。对换相失败的防控是电网运行关注的重点问题之一。若直流输电系统换相失败后能够快速恢复,其引起的一次直流功率冲击对电网安全稳定运行的威胁较小,主要通过优化直流控保、配置动态无功补偿等措施降低直流系统发生换相失败的概率,但并不能完全避免此

类风险。交流电网电压不稳定可能导致直流系统无法顺利从换相失败状态中恢复,引发后续换相失败^[7-8],对电网安全稳定运行产生巨大威胁,需对其进行设防。目前工程上以直流输电系统换相失败引起的功率扰动最大次数为判据,对直流输电系统实施主动闭锁^[9],该判据通过离线整定,无法充分考虑交直流系统实际的动态过程和直流控制系统的响应机制,可能造成不必要的直流闭锁。对后续换相失败风险进行预判和评估是对其实施精准控制的前提,也是工程中迫切需要解决的问题。

换相失败是交流系统与直流控制系统交互作用的综合结果,无法对其进行精确的解析计算。在直流控制系统中,主要是根据三相交流电压判断交流侧故障是否可能引起换相失败,并将其与故障前该电压的差值转化为角度值以实现提前触发^[10-12],虽然该预测型技术可以对触发角实现提前补偿,一定程度降低换相失败风险,但是控制中仅考虑了换相电压的因素,忽略了直流电流等因素的影响,依赖单一判据提前触发甚至可能对交流系统及直流系统的后续恢复造成不利影响^[13]。研究也有不少学者对换相失败预测提出了其他的技术路线,如基于直流电流的预测方法^[14]、基于电压波形拟合的预测方法^[12]、基于临界阻抗的预测方法^[15],但上述方法只针对故障下的首次换相失败,未考虑后续换相失败的适应性。同一故障下,后续换相失败相对于首次换相失败,最大的区别在于直流控制系统的参与深度。首次换相失败时由于故障下电压的迅速变化,直流控保可能来不及响应,可认为首次换相失败主要是由交流系统的电压变化引起的,但直流控制系

收稿日期:2020-09-22;修回日期:2021-04-25

基金项目:国网电力科学研究院有限公司科技项目(SGSR0000KJJS1903177)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Electric Power Research Institute (SGSR0000KJJS1903177)

专利:一种基于直流电流的连续换相失败风险预警方法和装置(202010286610.8)

统有足够的时间参与后续换相失败的演变过程,后续换相失败是交流系统电气量变化与直流控制系统交互作用的综合结果,其预判难度远大于首次换相失败。目前针对后续换相失败的预判方法还比较少。文献[13]提出了基于临界电压的后续换相失败风险预判方法,并基于该风险判据提出了控制策略,但该方法侧重于交流电压二次跌落引起的后续换相失败,对于直流电流上升较快等其他因素引起的后续换相失败风险未有研究;文献[16]提出了基于触发角偏差量的判断方法,判断当前系统参数下单相跳闸是否会引发后续换相失败,但是该方法未考虑动态过程中直流电流和交流电压变化的影响;文献[17]研究了考虑换相电压失真和直流电流变化的后续换相失败预测方法,但其预测的时间提前量较少;文献[18]研究了基于统计学习算法的预警方法,对机理性的研究不足。

本文在现有研究基础上,从后续换相失败机理出发,计及动态过程中交流电压和直流电流的变化,以前次换相失败后的直流电流为判据预判发生后续换相失败的风险;另外,考虑到直流控制系统复杂性导致的无法精确计算判据指标的难题,本文受天气、灾害等其他领域分级预警思路的启发,对后续换相失败划分风险等级,以期为后续精准控制、量化评估等方向的研究提供参考。

1 直流输电系统换相失败过程及关键参数

在直流输电系统换相过程中,从被换相阀的电流过零点算起,到该阀重新被加上正向电压为止,这段时间所对应的角度被称为关断角。目前大功率晶闸管的阀阻断能力恢复时间约为 0.4 ms(折算成关断角约为 7°)。当交流电压下降、直流电流上升时,晶闸管关断时间不能满足其阻断能力恢复时间的需求,引发换相失败。

根据直流输电系统准稳态方程,逆变侧关断角 γ 满足:

$$\cos \gamma = \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_d}{U_{ac}} + \cos \beta \quad (1)$$

式中: β 为逆变侧超前触发角; X_{ci} 为逆变侧换相电抗; I_d 为直流电流; U_{ac} 为逆变侧交流电压。

交流电压跌落、直流电流上升等扰动均有可能导致直流系统发生换相失败。若交流系统恢复较快、直流控制器动作合理,换相失败发生后系统迅速恢复稳定;若交流系统恢复缓慢或直流控制器控制不当^[19-20],有可能导致直流输电系统发生多次换相失败。

图 1 为基于 Cigre 高压直流标准测试模型仿真得到的 3 次换相失败案例,图中 I_d 为标么值,后同。 T_0 时刻故障发生,电压跌落,直流输电系统发生换相

失败,一定延时后直流控保动作,由于低压限流作用将直流电流限制在较低水平,定关断角控制迅速拉升直流关断角至参考值以上后逐渐回落。 T_0 至 T_1 时刻交流电压仍维持在较低水平,直流电流无法正常恢复, T_1 时刻发生第二次换相失败。故障清除后交流电压、直流电流逐渐恢复,关断角迅速拉升后逐渐回落,关断角回落至参考值附近时,定关断角控制的作用减弱,但此时直流电流参考值高于电流实际值,直流电流继续上升,根据式(1),电流上升导致关断角进一步跌落, T_2 时刻发生第三次换相失败。

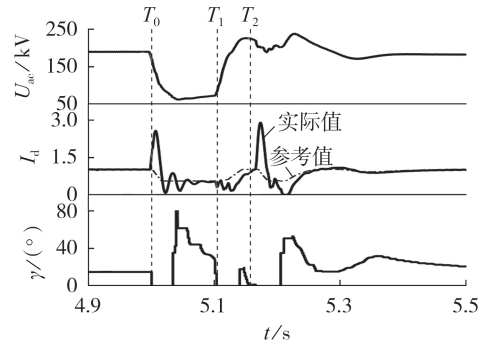


图 1 多次换相失败过程

Fig.1 Process of multiple commutation failures

由多次换相失败过程可知,前次换相失败恢复过程中的关断角、直流电流、交流电压与后续换相失败密切相关,基于此分析后续换相失败的风险。

2 直流输电系统后续换相失败风险区间

根据准稳态方程,将关断角作为中间变量,推导关断角与直流电流、交流电压的关系,预估不同时刻关断角的运行范围,最终得到以直流电流为判据的后续换相失败风险区间。

2.1 动态过程中任意时刻的关断角运行区间

由式(1)可知, I_d 上升、 U_{ac} 下降均会导致关断角跌落,且 I_d 上升越多、 U_{ac} 下降越多,关断角跌落越大。

当 I_d 上升较小时,忽略换相电抗的变化,对于恢复过程中的 2 个时刻 t_1 和 t_2 ($t_2 > t_1$),有:

$$\cos \gamma_2 - \cos \gamma_1 = \sqrt{2} X_{ci} \left(\frac{I_{d2}}{U_{ac2}} - \frac{I_{d1}}{U_{ac1}} \right) + (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (2)$$

式中: γ_1 、 γ_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻逆变侧关断角; I_{d1} 、 I_{d2} 分别为 t_1 、 t_2 时刻直流电流; U_{ac1} 、 U_{ac2} 分别为 t_1 、 t_2 时刻逆变侧交流电压; β_1 、 β_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻逆变侧超前触发角。

若忽略逆变侧定关断角控制器的调节作用,则 $\cos \beta_2 = \cos \beta_1$ 。令 $\Delta I_d = I_{d2} - I_{d1}$,则 t_2 时刻关断角满足:

$$\cos \gamma_2 = \frac{\sqrt{2} X_{ci} \Delta I_d}{U_{ac2}} + \cos \gamma_1 - \sqrt{2} X_{ci} \left(\frac{I_{d1}}{U_{ac1}} - \frac{I_{d1}}{U_{ac2}} \right) \quad (3)$$

根据式(3), $\cos \gamma_2$ 与 ΔI_d 的关系见图 2。①若交

流电压保持不变,即 $U_{ac2}=U_{ac1}$, $\cos \gamma_2$ 与 ΔI_d 的关系为曲线 ab ; ②若交流电压上升,即 $U_{ac2}>U_{ac1}$, $\cos \gamma_2$ 与 ΔI_d 的关系曲线在曲线 ab 下方, U_{ac2} 上升程度越大,其运行曲线距离曲线 ab 越远,当 U_{ac2} 上升至最大值 U_{ac2max} 时,对应的关系曲线为曲线 cd ; ③若交流电压下降,即 $U_{ac2}<U_{ac1}$, $\cos \gamma_2$ 与 ΔI_d 的关系曲线在曲线 ab 上方, U_{ac2} 下降程度越大,其运行曲线距离曲线 ab 越远,记 U_{ac2} 下降至最小值 U_{ac2min} 时,对应的关系曲线为 ef 。因此,随着直流电流和交流电压的变化, $\cos \gamma_2$ 取值在曲线 ef 与 cd 围成的区域内。

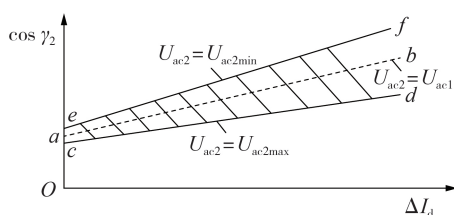


图2 $\cos \gamma_2$ 与 ΔI_d 的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between $\cos \gamma_2$ and ΔI_d

2.2 发生后续换相失败的风险区间

由式(3)可知, $\cos \gamma_2$ 随 U_{ac2} 变化而变化,将 $U_{ac2}=U_{ac2max}$ 和 $U_{ac2}=U_{ac2min}$ 分别代入式(3),即分别对应运行曲线 cd 和 ef ,如图3所示。以关断角小于临界关断角 γ_{lim} 为换相失败判据,计算可得 $\cos \gamma_{lim}$ 与运行边界相交的2个交点,对应的 ΔI_d 记为 ΔI_{d4} 和 ΔI_{dB} ,其表达式分别为:

$$\Delta I_{d4} = \frac{U_{ac2min}}{\sqrt{2} X_{ci}} \left[\cos \gamma_{lim} - \cos \gamma_1 + \sqrt{2} X_{ci} \left(\frac{I_{d1}}{U_{ac1}} - \frac{I_{d1}}{U_{ac2min}} \right) \right] \quad (4)$$

$$\Delta I_{dB} = \frac{U_{ac2max}}{\sqrt{2} X_{ci}} \left[\cos \gamma_{lim} - \cos \gamma_1 + \sqrt{2} X_{ci} \left(\frac{I_{d1}}{U_{ac1}} - \frac{I_{d1}}{U_{ac2max}} \right) \right] \quad (5)$$

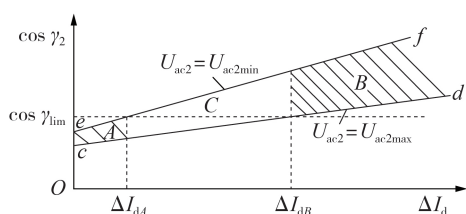


图3 发生后续换相失败的风险区间

Fig.3 Risk interval when subsequent commutation failure happened

①当 $\Delta I_d < \Delta I_{d4}$ 时, $\cos \gamma_2$ 运行在区域A内, $\cos \gamma_2 < \cos \gamma_{lim}$ 均成立,有 $\gamma_2 > \gamma_{lim}$,不会发生后续换相失败; ②当 $\Delta I_d > \Delta I_{dB}$ 时, $\cos \gamma_2$ 运行在区域B内, $\cos \gamma_2 > \cos \gamma_{lim}$ 均成立,有 $\gamma_2 < \gamma_{lim}$,必然发生后续换相失败; ③当 $\Delta I_{d4} \leq \Delta I_d \leq \Delta I_{dB}$ 时, $\cos \gamma_2$ 运行在区域C内,该区域内是否发生后续换相失败取决于 I_d 和 U_{ac2} 的变化程度,

在 $\cos \gamma_{lim}$ 下方的区域内不会发生换相失败, $\cos \gamma_{lim}$ 上方的区域内会发生换相失败,因此在区域C内发生后续换相失败的风险低于区域B、高于区域A。

2.3 发生后续换相失败的风险等级划分

ΔI_{d4} 和 ΔI_{dB} 是预判后续是否发生换相失败的依据。当电流上升量超过 ΔI_{dB} 时,关断角将跌落至临界关断角以下;当电流上升量小于 ΔI_{d4} 时,关断角始终维持在临界关断角以上。

在直流输电系统换相失败后的恢复过程中,定电流控制环节控制直流电流跟踪其参考值,电流上升幅度由电流参考值和实际值决定。因此,可根据 t_1 时刻电流值估算直流电流最大上升幅度。令 $I_{dB} = I_{dref} - \Delta I_{dB}$ (I_{dref} 为直流电流参考值), $I_{d4} = I_{dref} - \Delta I_{d4}$, 则:

1)若 $I_{d1} > I_{d4}$,在定电流控制环节的作用下,电流上升幅度小于 ΔI_{d4} ,运行在图3所示的区域A,关断角维持在临界关断角以上,不会发生后续换相失败,因此, $I_{d1} > I_{d4}$ 为直流发生后续换相失败的低风险区(即附录A图A1中的I区);

2)若 $I_{d1} < I_{dB}$,在定电流控制环节的作用下,电流上升幅度可能大于 ΔI_{dB} ,运行在图3所示的区域B,关断角跌落至临界关断角以下,必然发生后续换相失败,因此, $I_{d1} < I_{dB}$ 为直流发生后续换相失败的高风险区(即附录A图A1中的III区);

3)若 $I_{dB} \leq I_{d1} \leq I_{d4}$,电流上升幅度介于 ΔI_{dB} 和 ΔI_{d4} 之间,运行在图3所示的区域C,关断角与临界关断角的相对关系由交流电压决定,该区域内发生后续换相失败的风险低于区域B、高于区域A,将其定义为中度风险区(即附录A图A1中的II区)。

电流边界值 I_{d4} 和 I_{dB} 表达式分别如式(6)、(7)所示。

$$I_{d4} = I_{d0} - \frac{U_{ac2min}}{\sqrt{2} X_{ci}} \left[\cos \gamma_{lim} - \cos \gamma_1 + \sqrt{2} X_{ci} \left(\frac{I_{d1}}{U_{ac1}} - \frac{I_{d1}}{U_{ac2min}} \right) \right] \quad (6)$$

$$I_{dB} = I_{d0} - \frac{U_{ac2max}}{\sqrt{2} X_{ci}} \left[\cos \gamma_{lim} - \cos \gamma_1 + \sqrt{2} X_{ci} \left(\frac{I_{d1}}{U_{ac1}} - \frac{I_{d1}}{U_{ac2max}} \right) \right] \quad (7)$$

式中: I_{d0} 为稳态运行时直流电流。若能在 t_1 时刻预测 t_2 时刻的 U_{ac2max} 和 U_{ac2min} ,则可根据直流电流变化判断后续换相失败风险程度。

3 直流输电系统后续换相失败风险预判方法

根据式(6)、(7),对后续换相失败的风险进行预判。该方法的具体流程如下:①选取预判时刻 t_1 ; ②预估交流电压的最大值 U_{ac2max} 和最小值 U_{ac2min} ; ③根

据式(6)、(7)计算电流边界值 I_{d1} 和 I_{d2} ;④根据 t_1 时刻实时电流的大小,判断后续换相失败的风险区间。

3.1 选取预判时刻 t_1

根据直流定关断角控制原理,关断角越接近参考值,定关断角控制环节的作用越弱。当 t_1 时刻关断角越接近参考值时,判断越准确。以关断角等于参考值的时刻作为预判时刻 t_1 ,此时 $\gamma_1 = \gamma_{ref}$, γ_{ref} 为直流系统定关断角控制参考值。在实际测量时,可以前次换相失败恢复过程中第一次捕捉到 $\gamma_1 \leq \gamma_{ref}$ 的时刻作为 t_1 时刻。关断角取一个周期内各换流阀关断角的最小值。

3.2 预估 U_{ac2max} 和 U_{ac2min}

交流电压变化受到交流系统强度、动态无功支撑能力、近区无功补偿容量响应速度、直流恢复过程中的交直流无功交换等多个因素影响,其在直流恢复过程中的变化无法精确预测。

考虑到恢复过程中直流电流呈上升趋势,可根据直流电流上升速率预估直流电流最大上升时间,并结合 t_1 时刻的交流电压变化率,估算直流电流上升过程中交流电压的最大变化幅度,从而预估 t_2 时刻交流电压的最大值 U_{ac2max} 和最小值 U_{ac2min} 。

1) 预估电压变化率。

在 t_1 时刻检测交流电压 U_{ac1} 的变化率,并将其作为后续电压变化率的估算值,即:

$$K_U = dU_{ac1}/dt \quad (8)$$

式中: K_U 为 t_1 时刻检测的 U_{ac1} 变化率。

考虑到采样数据为离散数据,无法直接获取电压变化率,需对数据进行处理。为了提升数据采样的可靠性,本文采用动态时间窗的形式对数据进行处理,具体处理过程见附录 B。

2) 预估电压变化最大持续时间。

在直流恢复过程中,定电流控制环节控制直流电流直至其恢复至参考值,根据 t_1 时刻电流变化速度及其与参考值的差值估算直流电流上升时间。

$$K_I = dI_{d1}/dt \quad (9)$$

$$T = (I_{dref} - I_{d1})/K_I \quad (10)$$

式中: K_I 为 t_1 时刻检测到的直流电流 I_{d1} 的变化率; T 为直流电流上升的估算时间。 K_I 计算过程中的数据处理方法同 K_U 。

I_{dref} 由直流控保低压限流环节控制输出,当直流电流参考值取最大值时,对应的 T 最大,此处取直流系统稳态运行时直流电流 I_{d0} 。则将 $I_{dref} = I_{d0}$ 代入式(10),可得直流上升最大预估时间 T_{max} 为:

$$T_{max} = (I_{d0} - I_{d1})/K_I \quad (11)$$

3) 预估 U_{ac2max} 和 U_{ac2min}

在 t_1 时刻预估 t_2 时刻交流电压运行边界 U_{ac2max} 和 U_{ac2min} 。

$$U_{ac2max} = U_{ac1} + |K_U| T_{max} \quad (12)$$

$$U_{ac2min} = U_{ac1} - |K_U| T_{max} \quad (13)$$

将 $\cos \gamma_1 = \cos \gamma_{ref}$ 及式(12)、(13)代入式(6)、(7),即可求得边界电流 I_{d1} 和 I_{d2} ,再根据 t_1 时刻实际直流电流 I_{d1} 和 I_{d1} 、 I_{d2} 的大小关系判断后续换相失败的风险区间。

4 算例验证

利用 PSCAD 软件,以 Cigre 高压直流标准测试模型为基础,在不同条件下对本文所提方法的效果进行验证。测试用直流系统基本参数设置如下:额定功率为 1000 MW;额定电流为 2 kA;额定电压为 500 kV;逆变侧换相电阻为 13.32 Ω ;正常运行关断角为 15°;临界关断角为 7°。模拟逆变侧三相短路故障,第 5 s 时故障发生,持续 0.1 s。在不同的受端短路比工况下设置不同接地阻抗的故障场景,计算各次关断角跌落后继续发生后续换相失败的风险。采样频率为 20 kHz。以短路比为 2.5 的工况为例,模拟不同接地阻抗的故障场景。

4.1 算例 1

设故障接地阻抗为 10 Ω ,故障下交流电压、直流电流、逆变侧关断角波形见图 4。

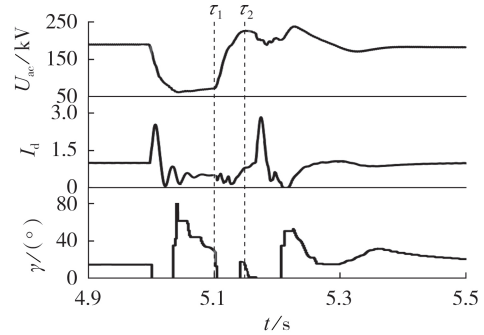


图 4 算例 1 下高压直流输电系统换相失败仿真结果

Fig.4 Simulative results of commutation failure of HVDC transmission system in Case 1

τ_1 时刻(5.103 55 s)满足关断角判据,算法启动,此时直流电流为 1.038 kA,计算得到 $I_{d1}=2.116$ kA, $I_{d2}=1.726$ kA。 τ_1 时刻发生后续换相失败的风险落入 III 区,即高风险区;而根据时域仿真结果,实际确实发生了第二次换相失败。 τ_2 时刻(5.149 3 s)满足关断角判据,直流电流为 1.598 kA,计算得到 $I_{d1}=1.765$ kA, $I_{d2}=1.648$ kA, τ_2 时刻判断发生后续换相失败的风险落入 III 区,即高风险区;根据时域仿真结果,发生了第三次换相失败。后续不满足判据条件,不再进行判断。该算例中,所得到的风险区间与仿真结果吻合。

4.2 算例 2

设故障接地阻抗为 60 Ω ,故障下交流电压、直流电流、逆变侧关断角曲线如图 5 所示。

τ_1 时刻(5.127 35 s)满足关断角判据,算法启动,

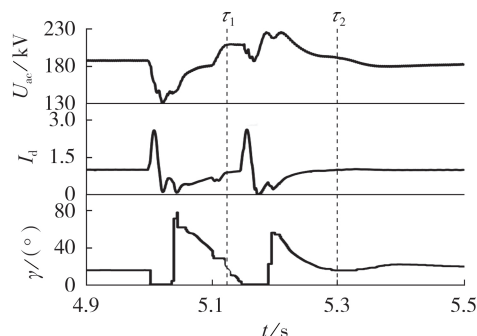


图5 算例2下高压直流输电系统换相失败仿真结果

Fig.5 Simulative results of commutation failure of HVDC transmission system in Case 2

此时直流电流为 1.792 kA, 计算得到 $I_{da}=1.796$ kA, $I_{db}=1.787$ kA。 τ_1 时刻发生后续换相失败的风险落入 II 区, 即中度风险区; 而根据时域仿真结果, 实际发生了第二次换相失败。 τ_2 时刻 (5.305 55 s) 满足关断角判据, 直流电流为 1.994 kA, 计算得到 $I_{da}=1.75$ kA, $I_{db}=1.72$ kA, τ_2 时刻判断发生后续换相失败的风险落入 I 区, 即低风险区; 根据时域仿真结果, 实际未发生后续换相失败。后续不满足判据条件, 不再进行判断。该算例中, 所得到的风险区间与仿真结果吻合。

4.3 算例3

设故障接地阻抗为 110 Ω , 故障下交流电压、直流电流、逆变侧关断角曲线如图6所示。

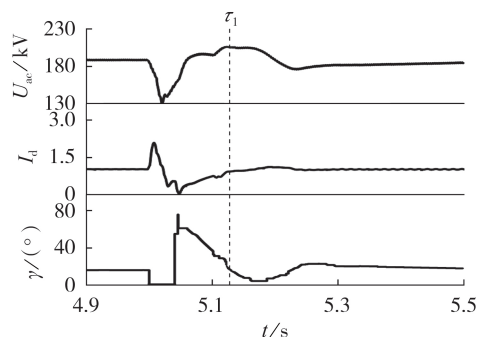


图6 算例3下高压直流输电系统换相失败仿真结果

Fig.6 Simulative results of commutation failure of HVDC transmission system in Case 3

τ_1 时刻 (5.132 35 s) 满足关断角判据, 算法启动, 此时直流电流为 1.835 kA, 计算得到 $I_{da}=1.909$ kA, $I_{db}=1.614$ kA。 τ_1 时刻发生后续换相失败的风险落入 II 区, 即中度风险区; 而根据时域仿真结果, 实际未发生第二次换相失败, 处于临界换相失败状态。后续不满足判据条件, 不再进行判断。该算例中, 所得到的风险区间跟仿真结果基本吻合, 略偏保守。

因为本文方法认为关断角近似于参考值, 直流定关断角控制环节作用很小, 忽略了预判时刻附近的定关断角控制环节的作用, 方法略偏保守, 在临界换相失败附近, 可能会判断为更高一级的风险。

另外, 以接地阻抗为 110 Ω 的场景为例, 仿真分析了短路比为 2.75 (算例4)、3.0 (算例5) 的结果, 算例分析结果见附录C。附表D表D1、D2分别为不同短路比下所处的风险区距离低风险边界的距离 (I_d-I_{da}) 以及各故障下直流后续换相失败判断结果。分析结果显示, 短路比越高, 所处的风险区距离低风险边界的距离 (I_d-I_{da}) 越远, 后续换相失败风险越低。这也符合交流网架越强、后续换相失败风险越低的工程经验。

算例验证结果表明, 换相失败恢复过程中直流电流能够表征发生后续换相失败的风险程度。根据直流电流划分的后续换相失败风险区间, 能够较为准确地反映直流发生后续换相失败的风险程度。需要说明的是, 本文在风险区间的理论推导中忽略了定关断角控制的作用。这是由于定关断角控制由关断角实际值与参考值的偏差所决定, 本文所提预判时刻即为关断角等于参考值的时刻, 在预判时刻附近关断角与参考值的偏差很小, 定关断角控制环节发挥的作用很小, 所以理论推导中忽略了该环节的作用, 本文基于该假设的理论推导略保守。当 I_{da} 与 I_{di} 相近时, 可能会将换相失败风险判别为较高一个等级 (算例3)。当 I_{da} 与 I_{di} 相差较大时, 能够较准确判断后续换相失败的风险等级。

5 结论与展望

本文基于针对直流输电系统多次换相失败发生过程的研究, 提出一种对称故障下基于直流电流的后续换相失败风险预判及风险等级划分方法。换相失败后的恢复过程是交流系统电气量变化和直流控制系统动作的综合结果, 同时交流电压、直流电流等电气量的变化也蕴含了直流关断角变化趋势的信息, 可以根据该类电气量的变化对直流输电系统后续换相失败风险进行预判。

研究后续换相失败的主要目的为制定控制策略降低其对交流系统的影响, 所提方法能够反映直流输电系统发生后续换相失败的风险程度, 可为后续控制策略的制定提供参考。需指出的是, 由于直流输电系统控制环节繁多、交直流交互演变机理复杂, 难以得到直流输电系统后续换相失败的准确性判断指标, 本文侧重于根据交直流系统的实时响应预判后续发生后续换相失败的风险程度。

目前本文的方法适用于对称故障下的后续换相失败场景, 研究中未考虑谐波、不对称等因素的影响, 后续将在此基础上开展深入研究。目前本文分析侧重于理论研究, 若要将其应用于工程实际, 还需考虑时间控制系统信号处理、设备控制周期等工程实现问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 戴熙杰. 直流输电[M]. 北京:水利电力出版社,1985:180-184.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2011:124-126.
- [3] 袁阳,卫志农,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 Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术,2016,40(4):985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] 金一丁,于钊,李明节,等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术,2018,42(7):2095-2102.
JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [6] MAZOUZ L, ZIDI S A, HAFIFA A, et al. Effect of commutation failures in a GIGRE model for HVDC link connected to AC network[C]//2018 International Conference on Applied Smart Systems. Medea, Algeria: IEEE, 2018: 1-6.
- [7] 周长春,徐政. 联于弱交流系统的HVDC故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术,2003,27(11):18-21.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21.
- [8] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术,2000,24(8):13-17.
YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang. Special issues and suggestions on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 13-17.
- [9] 张玉红,姜懿郎,秦晓辉,等. 改善直流因持续换相失败导致闭锁的功率指令速降措施研究[J]. 电网技术,2019,43(10):3569-3577.
ZHANG Yuhong, JIANG Yilang, QIN Xiaohui, et al. Research on countermeasure via fast decrease of DC power reference to alleviate DC lockdown risk due to continuous commutation failure[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3569-3577.
- [10] 陈光侵,傅闯,张勇军. 基于阀电流特征的高压直流换相失败检测方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):86-91,119.
CHEN Guangqin, FU Chuang, ZHANG Yongjun. Detection method of HVDC commutation failure based on characteristic of valve current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 86-91, 119.
- [11] 印月,刘天琪,艾青,等. 预防多馈入直流输电系统换相失败的直流功率控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):107-113.
YIN Yue, LIU Tianqi, AI Qing, et al. DC power control method for preventing commutation failure in multi-DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 107-113.
- [12] 王增平,刘席洋,郑博文,等. 基于电压波形拟合的换相失败快速预测与抑制措施[J]. 电工技术学报,2020,35(7):1454-1463.
WANG Zengping, LIU Xiyang, ZHENG Bowen, et al. The research on fast prediction and suppression measures of commutation failure based on voltage waveform fitting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1454-1463.
- [13] 汤奕,郑晨一,楼伯良,等. 抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J]. 电网技术,2019,43(10):3514-3522.
TANG Yi, ZHENG Chenyi, LOU Boliang, et al. Research on DC power control strategy for mitigating continuous commutation failure[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3514-3522.
- [14] 周博昊,李凤婷,宋新甫,等. 基于直流电流变化量的换相失败预测判别与控制系统优化[J]. 电网技术,2019,43(10):3497-3504.
ZHOU Bohao, LI Fengting, SONG Xinfu, et al. Commutation failure prediction and control system optimization based on DC current variation[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3497-3504.
- [15] LI G Q, ZHANG S, JIANG T, et al. A method of detecting commutation failure in multi-infeed HVDC systems based on critical failure impedance boundary[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [16] 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.
- [17] WANG Q, ZHANG C M, WU X Q, et al. Commutation failure prediction method considering commutation voltage distortion and DC current variation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 96531-96539.
- [18] 张国辉,李志中,王宾,等. 基于Adaboost的高压直流线路连续换相失败预警方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):69-77.
ZHANG Guohui, LI Zhizhong, WANG Bin, et al. Early warning method of HVDC line continuous commutation failure based on Adaboost algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 69-77.
- [19] 刘磊,林圣,刘健,等. 控制器交互不当引发后续换相失败的机理分析[J]. 电网技术,2019,43(10):3562-3568.
LIU Lei, LIN Sheng, LIU Jian, et al. Mechanism analysis of subsequent commutation failures caused by improper interaction of controllers[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3562-3568.
- [20] 景柳铭,王宾,董新洲,等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):116-123.
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 116-123.

作者简介:



王 玉

王 玉(1988—),女,江苏南通人,工程师,硕士,主要研究方向为交直流电网安全稳定分析与控制(E-mail: wangyu13@sgepri.sgcc.com.cn);

刘福锁(1981—),男,江苏连云港人,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为交直流电网安全稳定分析与控制(E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn);

雷 杰(1996—),男,湖北荆州人,助理工程师,硕士,主要研究方向为交直流电网安全稳定分析与控制(E-mail: Leijieju@163.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第142页 continued on page 142)

Expansion planning method of transmission network considering cascading failures

ZHOU Jing¹, ZHANG Heng¹, LIU Dundun¹, CHENG Haozhong¹, LI Gang², ZHANG Xiaohu²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. East China Power Grid Company, Shanghai 200210, China)

Abstract: To improve the power grid's ability to withstand multiple-faults, $N-k$ safety network constraints are often embedded in transmission network planning. The correlation between faults is not considered by the planning method, which leads to a large number of fault scenarios and some of them are inconsistent with the actual situation, moreover leads to redundant investment. A two-level transmission network expansion planning model considering cascading failures is proposed on the basis of considering the fault correlation. The upper model aims at minimizing the sum of line investment, operation and load shedding costs, and considers fault chain constraints. While the lower model aims at minimizing the load shedding, and checks the cascading failure of the planning method obtained from the upper model. The upper and lower models are linked by fault chain constraints, and new constraints are added by iteration to reduce the solution scale and accelerate the convergence of the algorithm. Taking the IEEE RTS-24 system as an analysis example, the simulative results show that the proposed model can resist cascading failures while improve the economy of the planning method.

Key words: expansion planning of transmission network; cascading failures; fault chain; $N-k$ safety network constraints

(上接第135页 continued from page 135)

Risk prediction and risk level classification of subsequent commutation failure under symmetrical fault based on change of DC current

WANG Yu, LIU Fusuo, LEI Jie, HOU Yuqiang, WU Xuelian, LI Wei

(Nari Group Corporation / State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: Under the influence of the unstable voltage of the converter bus, continuous power shocks caused by multiple commutation failures of HVDC (High Voltage Direct Current) transmission system have a great impact on the safe and stable operation of power system. It is an urgent problem to predict the risk of subsequent commutation failure according to the real time operation status of AC/DC system. After analyzing the basic process of commutation failure of HVDC transmission system, the relationship between the arc extinction angle of inverter side and the change of DC current is deduced according to the quasi-steady-state equation of HVDC transmission system. A method to predict the risk of subsequent commutation failure based on the change of DC current is put forward. The time when the arc extinction angle recovers to the reference value after the previous commutation failure is selected as the pre-determined time. By estimating the change range of AC voltage, the DC current rising range corresponding to the subsequent commutation failure is evaluated, and the risk level of subsequent commutation failure is classified in HVDC transmission system. The risk level of subsequent commutation failure is determined according to the pre-determined time. The validity of the proposed method is verified by the standard testing model of the Cigre HVDC system in PSCAD simulation software.

Key words: HVDC transmission system; subsequent commutation failure; risk prediction; risk level classification; quantitative assessment

附录 A

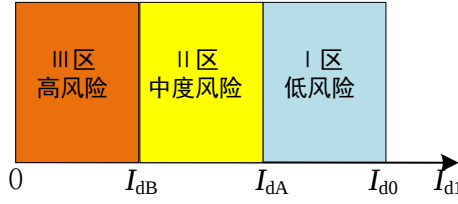


图 A1 不同电流对应的后续换相失败风险等级划分

Fig.A1 Risk level classification of subsequent commutation failure under different currents

附录 B

将第一次换相失败起始时刻记为 0，预判时刻记为 t_1 ，每相邻 M 个数据作为 1 个时间窗，数据获取动态时间窗示意图见图 B1。针对任一时间窗 n ，时间窗内数据设为 $A_{n1}, A_{n2}, A_{n3}, A_{n4}, \dots, A_{nM}$ 。首先取时间窗内 M 个数据的平均值，这样可以得到相对平滑的数据，提升数据可靠性。时间窗内数据的表达式为：

$$A_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M A_{nm} \quad (\text{B1})$$

在预判时刻 t_1 ，取所在的时间窗 N 和 $(N+1)$ 内电气量采样数据平均值的变化率作为 t_1 时刻电气量的变化率。这样相当于仅在预判时刻后 1 个采样间隔即可对后续换相失败的风险进行快速预判。因此，计算 U_{ac1} 的变化率，可以按照如下方式计算：

$$K_U = \frac{U_{ac1_{(N+1)}} - U_{ac1_N}}{\Delta t} \quad (\text{B2})$$

式中： $U_{ac1_{(N+1)}}$ 为时间窗 $(N+1)$ 内 5 个数据的平均值； U_{ac1_N} 为时间窗 N 内 5 个数据的平均值； Δt 为采样间隔时间。

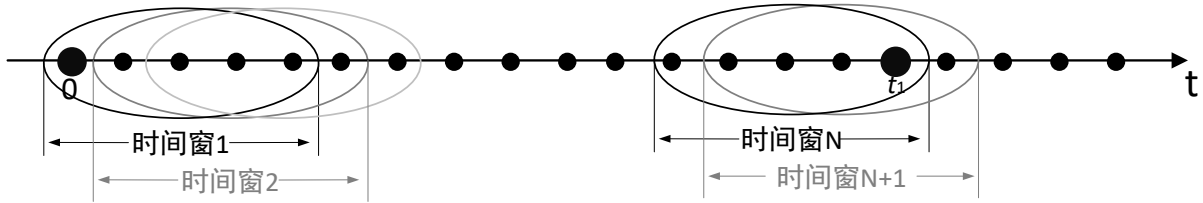


图 B1 数据获取动态时间窗示意图

Fig.B1 Schematic diagram of dynamic time window for data acquisition

附录 C

(1) 以接地阻抗 110Ω 的工况为例，模拟不同短路比工况下方法的适应性。

算例 4：短路比 2.75，故障接地阻抗 110Ω ，故障下交流换相电压、直流电流、逆变侧关断角曲线如图 C1 所示。

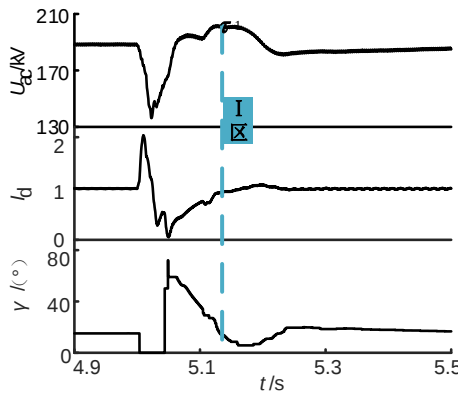


图 C1 算例 4 下直流输电系统换相失败仿真结果

Fig.C1 Simulative results of commutation failures of HVDC transmission system in Case 4

τ_1 时刻(5.132 45 s)满足关断角判据,算法启动,此时直流电流为 1.846 kA,计算得到 $I_{dA}=1.818$ kA, $I_{dB}=1.662$ kA。 τ_1 时刻发生第二次换相失败的风险落入 I 区,即低风险区,与仿真结果吻合。

算例 5: 短路比 3.0, 故障接地阻抗 110 Ω , 故障下交流换相电压、直流电流、逆变侧关断角曲线如图 C2 所示。

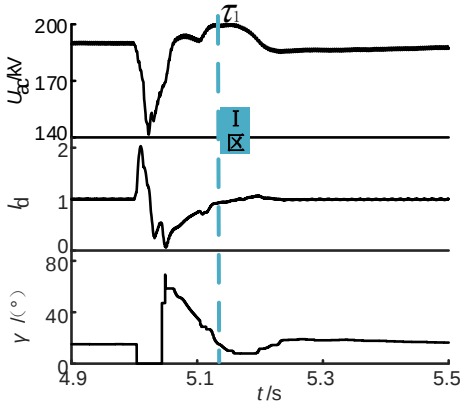


图 C2 算例 5 下直流输电系统换相失败仿真结果

Fig.C2 Simulative results of commutation failures of HVDC transmission system in Case 5

τ_1 时刻(5.135 9 s)满足关断角判据,算法启动,此时直流电流为 1.877 kA,计算得到 $I_{dA}=1.801$ kA, $I_{dB}=1.672$ kA。 τ_1 时刻发生后续换相失败的风险落入 I 区,即低风险区,与仿真结果吻合。

附录 D

表 D1 不同短路比下 I_d - I_{dA}

Table D1 I_d - I_{dA} under different SCR

短路比 SCR	I_d /kA	I_{dA} /kA	(I_d-I_{dA}) /kA
2.50	1.835	1.909	-0.074
2.75	1.846	1.818	0.028
3.00	1.877	1.801	0.076

表 D2 各故障下直流后续换相失败判断结果

Table D2 Risk calculative results of DC subsequent commutation failure under different faults

算例	预警时刻	$K_U/(\text{kV s}^{-1})$	$K_I/(\text{kA s}^{-1})$	I_{d1} /kA	U_{ac2} /kV	I_{dA} /kA	I_{dB} /kA	I_{d1} 所处风险区间	发生后续换相失败风险
1	τ_1 时刻(图 4)	702.899	-51.433	1.038	75.261	2.116	1.726	III	高风险
	τ_2 时刻(图 4)	-1 289.619	75.688	1.598	222.090	1.765	1.648	III	高风险
2	τ_1 时刻(图 5)	114.442	48.290	1.792	207.806	1.796	1.787	II	中度风险
	τ_2 时刻(图 5)	-1 265.771	5.868	1.994	190.142	1.750	1.720	I	低风险
3	τ_1 时刻(图 6)	-1 263.213	14.314	1.835	204.093	1.909	1.614	II	中度风险
4	τ_1 时刻(图 C1)	-1 420.800	29.280	1.846	201.041	1.818	1.662	I	低风险
5	τ_1 时刻(图 C2)	-1 336.320	27.280	1.877	199.248	1.801	1.672	I	低风险