

输电线路相间故障引发直流双极换相失败分析

刘磊¹, 李龙蛟², 谭博洋³, 李小鹏¹, 滕予非¹, 邹轶⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041; 4. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:对一起220 kV交流线路相间故障引发直流双极换相失败的原因开展了分析, 分析结果表明, 220 kV线路AB相故障后, 直流换流站500 kV交流母线电压遭受扰动, 主要表现为故障相电压幅值跌落、换相电压过零点偏移, 二者叠加引发了直流换相失败。并且, 作为实际工程中预防换相失败的主要手段, 换相失败预测控制在所提事件中未能及时识别故障, 对于第一次换相失败并未起到预防作用。此外, 换相失败受故障时刻等偶然因素与控制响应的复杂交互影响, 所提事件中, 正常的换相过程后紧跟换相失败, 无过渡换相过程可供控制参考调节, 情况较为不利。最后, 结合所提事故案例, 针对换相失败分析与抑制提出了相关建议。

关键词:高压直流输电; 换相失败; 交流线路相间故障; 换相失败预测控制

中图分类号: TM 732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)03-0057-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240310

Analysis of Bipolar Commutation Failure of HVDC Caused by An Interphase Fault of Transmission Line

LIU Lei¹, LI Longjiao², TAN Boyang³, LI Xiaopeng¹, TENG Yufei¹, ZOU Yi⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power UHV DC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The reason for a bipolar commutation failure (CF) caused by a 220 kV AC line interphase fault is analyzed, and the results show that 500 kV AC bus voltage of DC converter station suffers from disturbance after AB-phase failure of the 220 kV line. This disturbance is mainly manifested in the drop of fault phase voltage amplitude and the zero-crossing offset of commutation voltages. As a result, the combination of these two factors triggers CF. Furthermore, the commutation failure prevention (CFPREV) control, as the main method used to prevent CF in actual projects, fails to recognize the fault in time in this fault event and does not play a preventive role for the first CF. Additionally, CF is affected by the complex interaction of control response and accidental factors such as fault moment. In this fault event, the normal commutation process is immediately followed by CF and lacks a transition commutation process which can be adjusted for control reference, which is unfavorable. Finally, based on this fault case, some relevant suggestions are proposed for the analysis and mitigation of CF.

Key words: high voltage direct current (HVDC) transmission; commutation failure; AC line interphase fault; commutation failure prevention (CFPREV) control

0 引言

中国目前已建成世界上最大的交直流混联电网,各大区交流电网通过高压/特高压直流输电通道实现互联。换相失败是常规直流输电系统中最常见的故障之一。换相失败会导致直流电流短时激增,并造成直流功率大量损失,尤其是连续换相失败可能引发直流系统闭锁,严重威胁电网的安全稳定运行^[1-4]。随着后续直流工程的相继建成、投运,中国电网“强直弱交、多回直流集中馈入”的特性更加突出,将进一步导致换相失败发生更频繁、表现形式更复杂、影响范围更大。因此,对换相失败的分析 and 抑制具有重要意义。

下面以一起某 220 kV 交流线路相间故障引发直流双极换相失败事故为案例,结合现场录波数据分析了事故原因,重点关注故障后换相电压变化情况、换相失败预测控制响应情况以及故障时刻等偶然因素的影响;最后,针对换相失败分析与预防工作给出了相关建议。

1 事故概述

2023 年 6 月 25 日 16 时 41 分,某直流受端换流站近区某 220 kV 线路故障跳闸,选相 AB,重合闸未动作。同一时间,该直流双极换相失败一次,检测到交流侧 A 相电压低,站内无异常,双极直流 3000 MW 运行正常,监控后台报出“换相失败被检测到”“保护检测到系统扰动”“保护发出增大 GAMMA 角命令”等。故障期间,220 kV 变电站、直流换流站电压波形如图 1 所示。

所提事故中,220 kV 线路故障跳闸导致直流受端换流站母线电压遭受扰动,进而引发直流双极换相失败,下面针对换相失败原因及具体影响因素开展详细分析。

2 事故原因分析

2.1 外部扰动造成换相电压变化

交流系统故障扰动,造成直流系统逆变侧换流母线交流电压跌落,进而导致换流阀关断角 γ 过小,使得刚退出导通的阀承受反向电压时间不足而未能

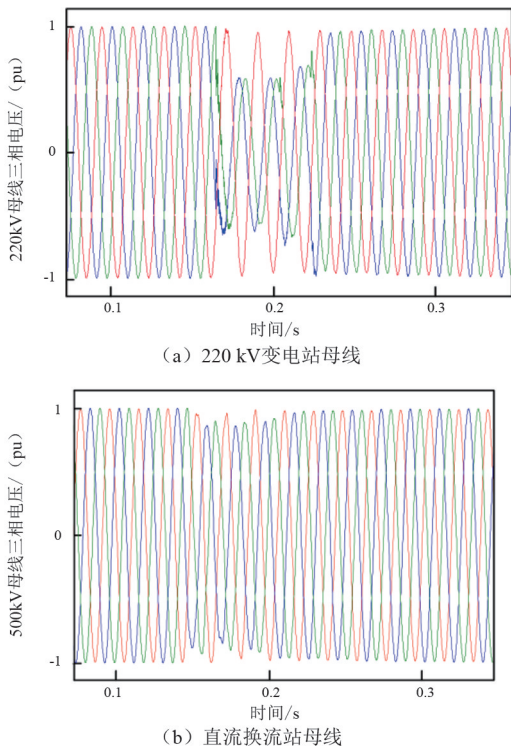


图 1 故障期间电压波形

恢复阻断能力,是换相失败的最主要诱因。对于正常的换相过程,关断角可以表示为^[1]

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}\omega L_c I_d}{U_L} + \cos \beta\right) \quad (1)$$

式中: L_c 为换相电抗; U_L 为换相电压(交流线电压); I_d 为直流电流; ω 为系统角频率; β 为越前触发角。假设在故障发生至换相失败发生之间的短时间内,系统的传输功率保持恒定,则有

$$U'_d I'_d = U_d I_d \quad (2)$$

式中, U'_d 、 I'_d 分别为故障后且换相失败前的直流电压、直流电流。同时,换相电压和直流电压的关系为

$$U_d = \frac{3U_L}{\sqrt{2}\pi} (\cos \gamma + \cos \beta) \quad (3)$$

如果不考虑换相失败前触发角指令的变化,联立式(1)一式(3),可以估算“假设换相失败单纯由换相电压跌落引起,所需的电压跌落幅度”^[5]为

$$\Delta U = 1 - \sqrt{\frac{\cos \gamma_n^2 - \cos \beta_n^2}{\cos \gamma'^2 - \cos \beta_n^2}} \quad (4)$$

式中: γ_n 、 γ' 分别为正常运行、换相失败对应的关断角; β_n 为正常运行(即换相失败前)的越前触发角。带入所提事故中直流系统换相失败前系统运行参数 $\beta_n = 39^\circ$ 、 $\gamma_n = 18.2^\circ$ 、 $\gamma' = 4.3^\circ$,可以得出 $\Delta U = 0.126$ 。即在不考虑控制调节的情况下,假设换相失败单

纯由电压瞬时值跌落引起,电压跌落幅度需要达到 12.6%,才会发生所提换相失败。

针对所提换相失败事件,分析故障录波图 2 可知:故障期间 A 相、B 相交流电压瞬时值有明显跌落,在换相失败发生之前,电压瞬时值峰值的最大跌落约 50.2 kV(约 11.6%)。需要注意的是电压最大跌幅并未达到 12.6%,且故障初期电压下降需要一定过程(跌幅逐步扩大至 11.6%,对换相的影响也逐步增大)。因此,电压跌落是所提换相失败的重要因素,但并非唯一诱因。

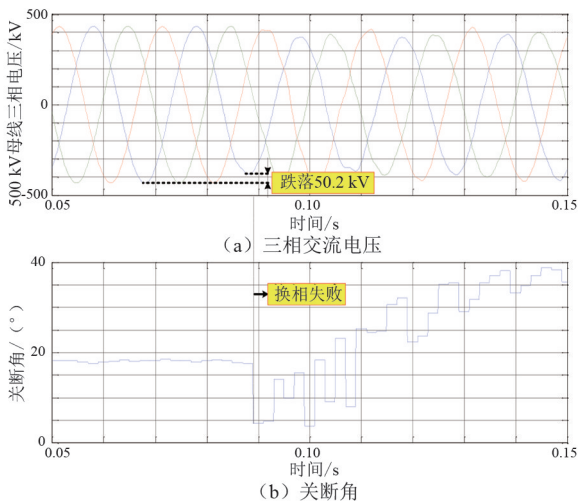


图 2 换相失败前交流电压跌落情况

进一步地,测量换相失败之前线电压 U_{AB} 的半周期可以看出,由于故障后 A、B 相电压波形畸变, U_{AB} 两次电压过零点之间的时间间隔由 10 ms 缩短至 9.7 ms,如图 3 所示。参考图 4,将正常换相电压波形(绿色虚线)与实际 U_{AB} 波形(绿色实线)叠加,也可看出,相比于正常工况,故障工况下换相电压过零点前移约 5.4° (对应 0.3 ms)。关断角本质上是换

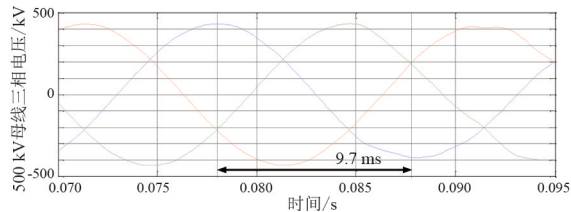


图 3 换相电压过零点间隔测量

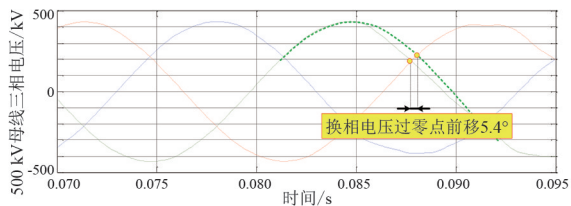


图 4 换相电压过零点前移

相结束时时刻至换相电压过零时刻之间的电角度,因此,本次换相失败事件中换相电压过零点的前移也直接导致了关断角的下降。

综合以上分析,220 kV 线路 AB 相故障后,直流换流站 500 kV 交流母线电压遭受扰动,主要表现为故障相电压幅值跌落,换相电压过零点偏移,二者叠加引发直流换相失败。

2.2 换相失败预测控制未及时响应

上面主要分析了换相失败的外部扰动影响因素,实际上在直流控制保护系统中,为了应对外部扰动、预防换相失败并在故障结束后加快直流恢复,通常会配置换相失败预测控制(commutation failure prevention, CFPREV)环节^[6]。该环节包括两个并行的部分:1) 基于零序检测法来检测单相故障;2) 基于交流电压 α/β 转换来检测三相故障。单相故障时,三相电压总和不为 0;三相故障时,交流电压 α/β 转换的输出向量小于稳态时的值。如果检测到发生交流故障,将提前触发换流阀。换相失败预测控制的逻辑简图如图 5 所示。

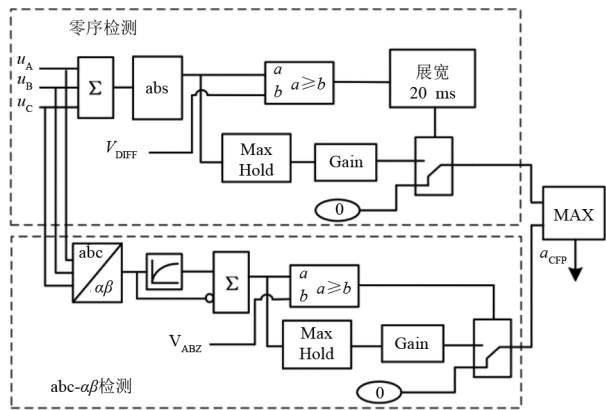


图 5 换相失败预测控制逻辑

换相失败预测控制通过调整输出 α_{CFP} 并将其引入到触发角计算逻辑中,可实现换流阀的提前触发,即令式(4)中的 β_n 大于 39° ,此时计算得到的系统可承受电压跌落幅度也会大于 12.6%,达到预防换相失败的效果。提前触发的幅度与故障严重程度有关。除了判定故障之外,换相失败预测控制还有一个启动条件:一旦检测到逆变侧已经发生了换相失败,则直接提前触发换流阀 5° 。

所提换相失败事件中,换相失败预测控制的输出与逆变侧关断角的对应关系如图 6 所示。可以看出:换相失败预测控制并未在故障发生至换相失败发生之间的时间段内响应,而是在换相失败(关断

角第一次跌落至 4.3°) 之后的 4 ms 才动作;此外,响应输出的初始值为 5° ,在 5.9 ms 后才增大至 8.7° ,这表明输出为 5° 期间还未检测到故障,仅是换相失败真实发生触发了控制动作。综上,所提事件中,换相失败预测控制未能及时识别故障,对于第一次换相失败并未起到作用,仅减少了后续的换相失败,直流系统对于换相失败未能实现有效的控制预防。

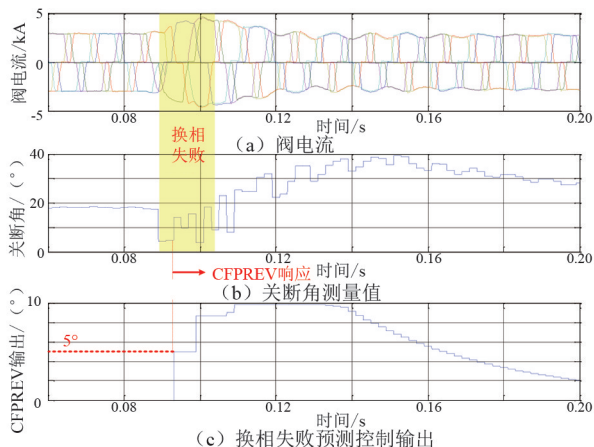


图 6 换相失败预测控制响应情况

2.3 故障时刻等偶然因素

直流系统换流阀的触发和换相是高度离散的,六脉动换流器每个周波只触发 6 次,即换相 6 次。换相的离散特点,决定了换相失败表现受故障时刻影响较大,主要表现在两方面:1)同一故障发生于非换相期间、换相期间,或是故障时刻距离换相开始/结束时刻的时间差不同,换相失败的表现都会存在差异;2)在一次触发完成后,本次换相无论成功与否都不能再主动调节,后续的触发角调整只能作用于下一次换相。因此,故障时刻不同导致故障后的关断角响应不同后,又会进一步影响关断角闭环控制的后续调节,进而再影响换相过程。

在所提事件中,特定的故障在特定的时刻发生后,正常换相过程后直接发生了换相失败,二者之间缺乏关断角跌落但换相失败未发生的过渡换相过程,如图 7 所示。在这种情况下,逆变侧的关断角闭环控制器或 AMAX 控制无法在换相失败前做出利于换相的调节。

假如同一时刻发生了其他类型的故障,对于图 7 中蓝色虚线框的换相过程,其换相电压过零点前移/不移,则可能并不会引发换相失败而只是导致关断角降低,此时控制可根据此降低的关断角来调整后续换相,之后则可能不发生换相失败;假如故障

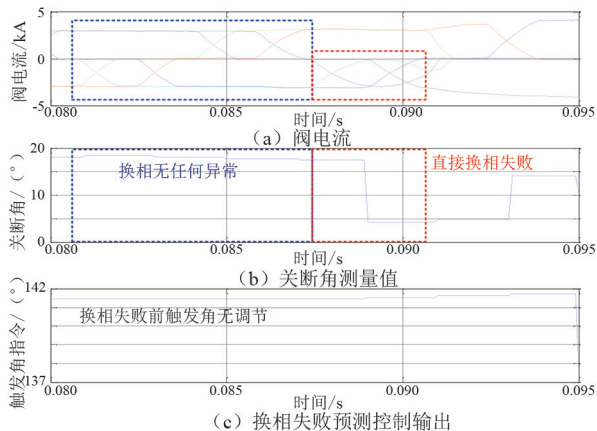


图 7 换相失败预测控制响应情况

发生晚若干毫秒,使得蓝色框换相过程中仅有后半段时间内有电压跌落,则可能也不会直接换相失败,同样可以为控制争取时间。简言之,换相失败受故障时刻、故障类型等偶然因素与控制响应的复杂交互影响,若本次故障发生于其他时刻并不一定会引发换相失败,而某些时刻发生的更轻微故障反而也可能引发换相失败。

3 结论

针对某 220 kV 交流线路相间故障引发直流双极换相失败事件,从外部电压扰动、直流控制响应等因素入手开展了事故原因分析,主要结论如下:

1) 直流受端换流站近区 220 kV 线路相间故障跳闸,导致换流站 500 kV 交流母线电压瞬时值跌落,换流阀换相电压不足,此外,不对称故障下换相电压过零点发生偏移,二者共同作用下直流发生换相失败。

2) 换相失败预测控制是预防换相失败的重要手段,但在所提事件中,换相失败预测控制未能及时识别故障,并且未对第一次换相失败起到作用,直流系统对于换相失败未能实现有效的控制预防。

3) 换相失败受故障时刻、故障类型等偶然因素与控制响应的复杂交互影响。所提换相失败事件中,正常的换相过程后紧跟换相失败,无过渡换相过程可供控制参考调节。

建议在交流系统故障引发换相失败的分析、预防工作中,重视相间短路故障,虽然其功率波动小,但会直接拉低换相电压(线电压),同时造成换相过零点偏移,引发严重的换相失败后果。特别的,传统

3.4.3 不同浮动电价比例的储能收益分析

为了对比不同浮动电价比例下的储能投资收益情况,在保证其余测算参数不变的情况下进一步提高峰谷电价浮动比例(尖峰电价上浮比例保持不变),分析得到该用户储能的投资收益年限如表 4 所示。

表 4 不同浮动电价比例的储能收益

峰谷浮动比例/%	峰谷价差/(元·kWh ⁻¹)	投资回收年限/a
60	0.642 3	8
65	0.695 8	7
70	0.749 4	7
75	0.802 9	6
80	0.856 4	6

随着峰谷价差的进一步提高,该用户储能的投资收益年限将进一步缩短,当电价浮动比例达到 75%时,投资回收年限将缩短至 6 年。

4 结 论

上面对用户侧储能的投资收益进行了测算分析,为了保证测算的准确性和实用性,测算过程中充分考虑了储能系统的充放电效率、容量衰减等一系列不利因素。在同时考虑政府补贴、容量电费管理、分时电价套利等收益情况下,执行两部制电价的 10 kV 储能工商业用户在“两充两放”的工作模式时,配置 200 kW/1000 kWh 的储能系统的静态投资回收期为 8 年左右,在进一步提高峰谷电价浮动比例的情况下可以缩短该储能系统的静态投资回收期,当峰谷电价浮动比例超过 75%时,投资回收年限将缩短至 6 年。

(上接第 60 页)

换相失败预测控制只配备三相故障检测、单相故障检测逻辑,建议专门针对相间故障设计检测逻辑。

参考文献

- [1] 刘磊. 高压直流输电系统换相失败抑制的控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- [2] LIU J, LIN S, ZHONG W L, et al. Improved identification method and fault current limiting strategy for commutation failure in LCC-HVDC [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(6): 1761-1772.
- [3] 钟文梁,刘健,林圣. 考虑换相电压多次谐波分量的换相失败抑制策略[J]. 电网技术,2023,47(1): 301-314.

参考文献

- [1] 李丰,姚韵,张会娟,等. 新型储能经济性及价格机制研究[J]. 价格理论与实践,2022(4): 66-70.
- [2] 陈思培,谢宇哲. 浙江省用户侧电化学储能经济效益分析[J]. 电力需求侧管理,2022,24(4): 105-110.
- [3] 彭伟,郑连清,郑天文. 分布式光伏储能系统的优化配置方法[J]. 四川电力技术,2022,45(1): 45-49.
- [4] 余勇,年珩. 电池储能系统集成技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2021.
- [5] 边涛. 电储能系统在商业项目中的应用[J]. 建筑电气,2020,39(11): 36-42.
- [6] 凌万水,刘刚,侯勇. 工业用户配置储能系统的经济收益分析[J]. 供用电,2019,36(8): 54-60.
- [7] 四川省发展和改革委员会. 关于进一步完善我省分时电价机制的通知:川发改价格规[2021]499号[EB/OL].[2023-01-15]. <http://fgw.sc.gov.cn/sfgw/c109344/2021/12/3/691e2c5fe36b401185163475067ef460.shtml>.
- [8] 郭莉,薛贵元,吴晨,等. 储能系统应用于削峰填谷的经济效益分析研究[J]. 电力需求侧管理,2019,21(5): 31-34.
- [9] 成都市发展和改革委员会. 关于申报 2022 年生态文明建设储能领导市级预算内基本建设投资项目的通知:成发改环资函[2022]53号[EB/OL].[2023-01-15]. <https://cddrc.chengdu.gov.cn/gkml/qtwj/1640276712472272896.shtml>.

作者简介:

廖 磊(1991), 硕士, 工程师, 从事市场拓展和智能用电研究工作。

(收稿日期:2023-08-10)

- [4] 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(S1): 1-10.
- [5] 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.
- [6] 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.

作者简介:

刘 磊(1993), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为特高压直流输电控制与保护。

(收稿日期:2023-08-11)