

特高压直流输电系统逆变站换相失败对整流站的影响及其保护配置策略优化建议

禹佳 孙文 李琨 刘俊杰

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

摘要: 换相失败是特高压直流输电系统最常见的动态故障之一。以宾(宜宾)一金(金华)特高压直流发生的任一桥换相失败造成的异常扰动为例,理论分析其成因,详述换相失败后整流侧交流系统频率、电压、无功的暂态特性,进而研究对400 V负荷(主泵软启动器、外冷风机、换流变压器冷却器)的后续影响;并试着剖析了区域电网间多回特高压直流系统同时换相失败对同一送端电网系统稳定的影响。最后结合CFPREV(换相失败预测)逻辑模块分析了宜宾站换相失败保护策略,并提出合理的优化建议。

关键词: 特高压直流输电; 暂态特性; 多回直流; 同时换相失败; 400 V 负荷; CFPREV

Abstract: Commutation failure is one of the most common dynamic faults in ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission system. Taking the abnormal disturbance caused by commutation failure on any bridge of Bin (Yibin) - Jin (Jinhua) UHVDC transmission system for example, the reasons are analyzed in theory, and the transient characteristics of frequency, voltage and reactive power of AC system in rectifier side after commutation failure are described in detail. Furthermore, the subsequent impact on 400 V load (soft starter for main pump, air cooling machine, cooler of converter transformer) is studied. And the influence of simultaneous commutation failure in multi-circuit UHVDC transmission system interconnecting regional power grids on the stability of the same power supply system is explored. Finally, combined with the logic module of CFPREV (commutation failure prediction), the protection policy for commutation failure of Yibin station is analyzed and the reasonable optimization suggestions are proposed.

Key words: UHVDC transmission system; transient characteristic; multi-circuit UHVDC transmission system; simultaneous commutation failure; 400 V load; CFPREV

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-12-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.004

0 引言

换相失败是逆变器和交流系统故障发生后的物理过程。绝大多数换相失败是由交流电压扰动引起,并且在目前设备情况下是不可避免的,它因此成为区域性互联直流输电系统常见的故障现象之一。据全国换流站多年运行经验,换相失败多发生在逆变侧。如果换相失败后控制不当,会引发多次连续换相失败,最终可能会导致直流传输功率的中断。且在目前形势下,特高压直流系统大密度接入交流电网,直流输电系统众多,送出、流入的直流系统并存,交直流电网互联,使得交直流系统间的影响应该更受关注,因此研究换相失败对直流输电影响具有重要的理论及现实意义。

1 换相失败过程的理论分析

实际工程中,整流站和逆变站是12脉动换流阀,等效为两个相位相差 30° 的6脉动桥。正常情况下触发角与触发越前角有如下关系^[1]。

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad (1)$$

式中: β 为触发越前角; α 为触发角。

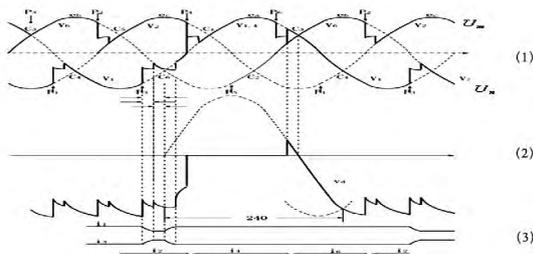
换相角 μ 的计算公式如式(2)。

$$\mu = -\gamma + \arccos\left(\cos\gamma - \frac{2X_r I_d}{\sqrt{2}E}\right) \quad (2)$$

式中: I_d 为直流电流; X_r 为换相电抗; E 为换相电压; γ 为熄弧角。换相角与触发越前角和熄弧角的关系如式(3)所示。

$$\gamma = \beta - \mu \quad (3)$$

在逆变器运行过程中,以阀 V_1 对阀 V_3 的换相过程为例,如图1波形所示。



(1) 阀电压波形 (2) 直流电压波形 (3) 阀电流波形

图1 逆变器换相过程

如果阀 V_3 触发时刻 P_3 的越前角 β_3 不够大,或换相角 μ_{13} 较大,以致换相结束后阀 V_1 的熄弧角 γ_1 小于关断所需要的角度(时间),则过了 C_6 点后,由于阀 V_1 元件内还有剩余载流子,因此在正向电压作用下即使不加触发也会重新开通,阀 V_3 已取得的电流又将倒换相到阀 V_1 ,倒换相结束时刻,阀 V_3 关断。

倒换相结束后逆变器仍有阀 V_1 和阀 V_2 导通着,如果没有故障控制,仍按原来的次序触发以后各阀,则在 P_4 时刻阀 V_2 与阀 V_4 开始换相,这时由于阀 V_1 和阀 V_4 同时导通,造成了直流侧短路。直到阀 V_6 导通后,直流短路才消失,逆变器直流电压开始逐渐恢复正常。如果阀 V_1 和阀 V_3 再次换相时不发生换相失败的故障,就能自行恢复正常运行,可以计算出发生换相失败到自行恢复,持续约 100 ms 以上,故障过程中逆变器反电压下降历时 240° [1]。

因此,逆变器运行中熄弧角 γ 非常重要,它的大小将影响阀是否可以成功关断。由上述分析及公式(3),可以得知造成换相失败的原因有:

- 1) 逆变器的换相电压下降。在触发越前角 β 不变的情况下,换相电压的降低增大了换相时间和换相角 μ ,从而使 γ 减小。
- 2) 逆变器侧交流系统不对称故障。这种故障会引起作为换相电压的交流线电压的过零点移动;当过零点前移时, γ 角就减小。
- 3) 直流电流 I_d 增大,使换相所需时间增加,也就是相应的换相角 μ 增大,所以 γ 也随之减小。
- 4) 触发越前角 β 过小,整定的熄弧角 γ 过小,或者由于触发脉冲异常(不触发或误触发)导致阀不能按正常次序进行换相。

2 逆变站换相失败导致整流站异常扰动实例

夏季等大负荷运行期间,交流电网因跳闸、雷击等原因极易出现扰动,造成逆变站换相失败。自2014年7月3日至2015年7月3日受华东交流系统扰动影响,金华换流站共发生30多次换相失败。

2.1 逆变站换相失败对整流站直流系统的影响

逆变站出现换相失败扰动时,查看整流站故障录波,扰动时整流站的直流系统波形如图2所示。

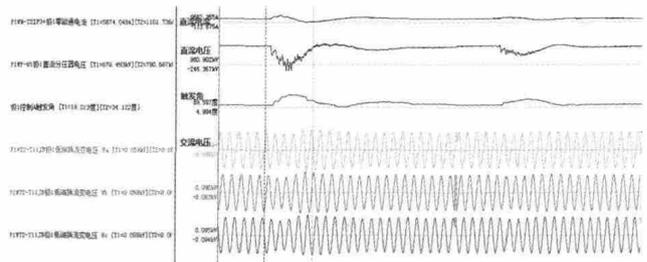


图2 7月15日金华站换相失败时宜宾站直流系统波形

通过以上故障录波以及前面分析可知,换相失败对直流的影响主要表现为:换相失败发生时整流侧直流电压急剧降低、直流电流增加,整流侧 α 角增大至 73.6° ,波动持续 100 ms 左右。

一般而言,逆变侧电网的交流扰动时间相对于换相时间是较长的,同时在直流落点较多的华东地区直流与直流、直流与交流之间的电磁耦合及线路参数的不平衡是复杂多变的。目前特高压直流是同塔双回直流线路,当一极发生扰动时,产生的暂态分量可能会影响到其他正常运行的另一极导线上。

一方面,同属一回直流的一极直流线路故障,可能导致另一极发生换相失败。比如:宾金直流极 I 线路故障,可能会引发极 II 换相失败。

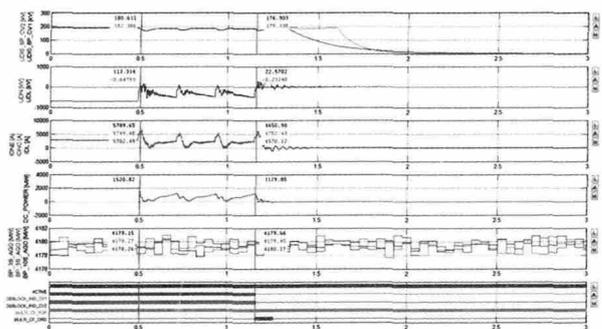


图3 宾金直流极 I 发生故障导致极 II 发生双桥换相失败

另一方面,两条直流受端落地点相距较近,电气距离也近,若一条直流发生故障,可能会引发另一条

直流发生换相失败。比如:由于南桥站与奉贤站落地点较近,葛一南直流发生故障,可能会引发复一奉直流逆变侧奉贤站发生换相失败。

综上所述,逆变侧换相失败会对整流侧直流系统带来如下影响:

1) 逆变站发生换相失败后,直流系统会出现电流过冲。整流侧直流电压急剧降低、直流电流增加,整流侧 α 角增大,波动持续100ms左右。

2) 换相失败后直流电压下降严重、直流电流增加,造成的交流系统波动可能会引发双桥换相失败或连续换相失败。

3) 对于同塔双回特高压直流而言,因其复杂的电磁耦合及分布参数,若一极发生故障,可能会导致另一极发生换相失败。

4) 对于直流落点密集的东部地区,若受端电网发生较为严重的故障,容易引发同一区域多条直流逆变站同时发生换相失败,进而影响跨区域电网间的联络。

2.2 逆变站换相失败对整流站交流系统的影响

逆变侧换相失败时,整流站直流功率出现大范围波动,受此影响整流站交流系统频率和电压也出现扰动。

2.2.1 换相失败对整流站交流系统频率的影响

换相失败后,直流系统整流器吸收的有功功率会突然变化,这成为整流站交流系统频率波动的扰动源。一般而言,整流侧交流系统频率波动大致可分为3个阶段。

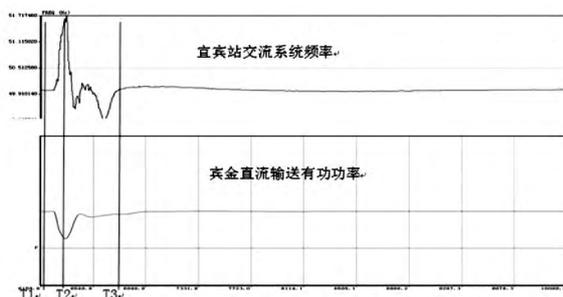


图4 7月15日金华站换相失败时宜宾站交流频率特性

第1阶段($T_1 - T_2$):直流系统换相失败后,在整流器定电流控制器和VDCL等辅助控制器的作用下,直流系统功率逐渐降低,交流系统频率上升;第2阶段($T_2 - T_3$):换相失败故障过程消失后,输送功率迅速恢复,交流频率逐渐降低;第3阶段(T_3 以后):直流输送功率逐渐稳定,系统频率逐步由暂态

恢复至稳态。

2.2.2 换相失败对整流站无功电压的影响

同时,对直流系统而言,交流系统相当于一个恒定的功率源,不仅要进行有功的传递,还要获取足够的无功来支撑换流阀的工作。正常情况下直流系统吸收的无功为

$$Q = UI \tan(\alpha + \frac{\mu}{2}) \quad (4)$$

发生换相失败后,随着直流系统有功的突变,在相关控制器的作用下,整流站吸收的无功也会相应发生边变化。逆变站发生换相失败后,整流站交流系统无功平衡遭到破坏,一般会经过5个阶段才能再次达到平衡。

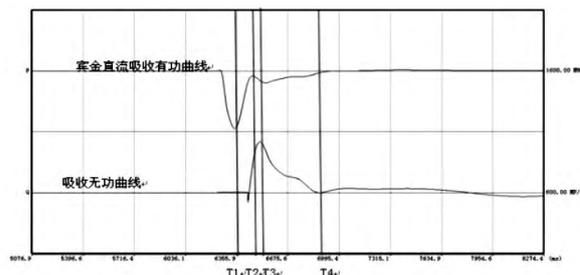


图5 7月15日金华站换相失败时系统无功特性

第1阶段(T_1 之前):由于换相失败,系统有功短时间内突变,整流站交流滤波器投切有个过程,导致系统无功来不及变化;第2阶段($T_1 - T_2$):随着交流滤波器的投切,整流站系统吸收的无功随着有功的增大而增大;第3阶段($T_2 - T_3$):在定电流控制器作用下,整流站吸收的无功随着有功的减小而增大;第4个阶段($T_3 - T_4$):在控制器及VDCL的作用下,整流站吸收的无功随着有功的增大而减小;第5阶段(T_3 以后):直流恢复过程中,整流站吸收的无功随着有功的增大而增大,并恢复至正常水平。

由以上分析可知,换相失败后,随着直流系统有功的突变,整流站交流系统的无功也会发生相应变化,导致整流站交流系统无功平衡遭到破坏,进而会引起交流系统电压波动。如7月15日录波显示宜宾站交流500kV系统电压最低至435kV,最高至617kV,扰动幅度在-13%~23.4%。

7月15日金华站发生换相失败后,整流站受500kV系统影响,站用电系统也受到了明显扰动,400V母线电压最低至314V,最高至476V,扰动幅度在-22%~19%,如图7所示。

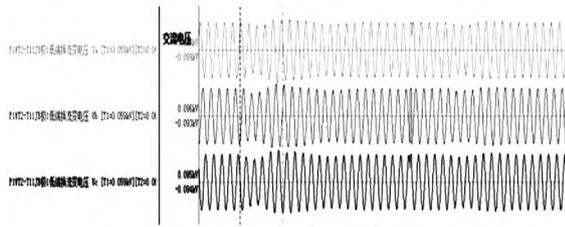


图 6 7 月 15 日宜宾站 500 kV 母线电压波形

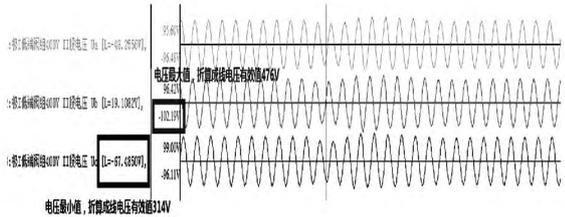


图 7 7 月 15 日宜宾站 400 V 母线电压波形

其实换相失败引起的交流扰动会影响到整流站 400 V 母线电压并非偶然。表 1 汇总了数次换相失败对整流站 400 V 电压扰动。

表 1 金华站换相失败时宜宾站 400 V 母线电压波动范围

日期	最大值 /V	最小值 /V	变化幅度 /V	扰动时间 /ms
2014-07-03	405	381	24	150
2014-07-04	408	378	30	84
2014-07-12	405	372	33	130
2014-07-15	427	351	76	74
2014-07-15	476	314	165	150
2014-07-15	476	326	150	177
2014-07-28	406	384	22	146
2014-08-05	462	346	116	190
2014-08-13	466	325	141	102
2014-08-24	465	332	133	83

通过表 1 可以发现,换相失败对 400 V 电压的扰动是客观真实存在的;而 400 V 母线所带的一些负荷,虽然属于低压设备,但却与高压直流输电的安全稳定运行息息相关。如若内水冷主泵软启动器故障,可能会导致直流闭锁的后果,因此,换相失败对整流站 400 V 电压的影响也是不容忽视的。表 2 是对宜宾站重要 400 V 负荷的定值梳理。

内水冷系统主泵软启动器有直流过压保护和欠压保护,从表 2 可以看出内水冷主泵软启动器设置有一段过压定值 438 V、延时 2 s,设置有两段欠压定值分别为 338 V、延时 2 s;298 V、延时 100 ms。当换相失败过程中,若 400 V 母线电压扰动异常,将会造

成软启动器过压保护或欠压保护正确动作。

表 2 宜宾站重要 400 V 负荷定值保护单

保护设备	过压设置(标么值:以 480 V 为基准)	欠压设置(标么值:以 311 V 为基准)	换流站
内冷主泵软启动器	438 V 延时 2 s	338 V 延时 2 s 298 V 延时 100 ms	宜宾站
外冷风机变频器	560 V (1.17 pu) 无延时	237 V (0.76 pu) 无延时	宜宾站极 I
换流变压器冷却器	592 V (1.23 pu) 无延时	259 V (0.83 pu) 无延时	宜宾站极 II
	440 V 延时 100 ms	340 V 延时 100 ms	宜宾站

极 I 外水冷风机变频器直流过压保护定值为 756 V,欠压保护定值为 320 V,换算成交流电压,分别为 560 V 和 237 V;即使考虑变频器电压测量误差 10% 的情况,定值虽然可以躲过电压波动,但也应该加强监视。极 II 外水冷风机变频器直流过压保护定值为 770 V,欠压保护定值为 405 V,换算成交流电压,分别为 570 V 和 300 V;若变频器电压测量有 5% 的误差,在逆变站发生交流扰动时存在欠压导致风机变频器故障的隐患。

换流变压器冷却器电源切换装置电压监视继电器过压保护动作值 440 V、返回值为 418 V,欠压动作值 340 V、返回值 357 V,保护延时均为 100 ms。逆变站换相失败引起交流电压扰动时,换流变压器两路交流电源可能会出现故障,导致换流变压器冷却器全停。

综上所述,换相失败对整流侧交流系统的影响如下:

1) 逆变站换相失败时间长度、时间点不同,对整流站交流系统的影响程度也不一样,但受端电网交流扰动影响送端换流站的情况没有改变;

2) 逆变侧发生换相失败后,直流系统吸收的有功功率先减小后增大,整流侧交流系统频率经历一个先增大后减小的波动过程;

3) 大负荷情况下若逆变站发生连续换相失败,导致整流站交流电网异常波动,可能会使逆变和整流侧双双发生换相失败,这样就有可能使逆变和整流侧陷入互相扰动的恶性循环中;

4) 对站内 400 V 重要负荷电源定值整定时,除考虑自投及过压、欠压保护外,还应考虑换相失败时对 400 V 母线电压的交流扰动因素。

统;延时 2.602 s, Y 闭锁,跳交流断路器。

3.3 换相失败保护策略优化建议

在目前策略下,结合特高压直流实际运行情况可知,特高压直流在 4 000 MW 功率以上时,若发生换相失败引起 2 次功率波动后,系统可以保持稳定;但如果发生 3 次及以上类似功率波动过程后,电网有可能稳定破坏。建议对换相失败保护进行优化。

1) 建议直流运行在 4 000 MW 以上增加双极换相失败加速段。

2) 建议极控检测本极在运阀组均发生连续任一桥换相失败,将本极动作信号置位并发给对极。极控检测本极动作信号和对极动作信号同时满足,闭锁本极。

3) 在增加双极换相失败加速段后,建议直流双极功率高于 4 100 MW,开放双极换相失败加速段跳闸功能;直流双极功率低于 4 000 MW,闭锁双极换相失败加速段跳闸功能。

4 结 语

以宾金直流换相失败为例,分析了逆变侧换相失败对整流侧交、直流系统的影响,提出以下建议:

1) 任一桥发生换相失败的保护策略及安稳装置的配合随着电网的发展还有进一步研究优化的空间。若阀组中任一桥发生换相失败,为防止陷入互相扰动的恶性循环中,建议换相失败保护定值加快闭锁该阀组时间。

2) 在目前的保护配置策略及安稳装置的配置策略下,若复奉、宾金、锦苏特高压直流同时换相失

败,直流系统被退回的有功功率会在同一送端电网(四川电网)产生较大的扰动,影响安全稳定运行。鉴于此,若检测到多条特高压直流同时发生换相失败,建议对处于在同一送端的多条直流启动安控装置的同时进行远方切机。

3) 直流系统在 4 000 MW 以上时,建议保护逻辑增加双极换相失败加速段程序。

4) 建议直流系统中对 400 V 负荷(主泵软启动器、风机变频器、换流变压器冷却器)保护整定值考虑换相失败导致的扰动因素。

5) 在发生换相失败后,建议送端电网降低系统的电气量(频率、电压)的暂态波动幅度,这样有利于直流系统快速恢复。

参考文献

- [1] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 2011.
- [2] 刘振亚. 特高压电网(第 1 版) [M]. 北京: 中国经济出版社 2005.
- [3] 国网运行分公司编组. 特高压直流换流站岗位培训教材: 二次系统 [M]. 北京: 中国电力出版社 2012.

作者简介:

禹 佳(1983), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

孙 文(1980), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

李 琨(1985), 本科, 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

刘俊杰(1989), 本科, 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2015-08-21)

(上接第 4 页)

[8] 万晓凤, 张燕飞, 余运俊, 等. 光伏电池工程数学模型比较研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 113-117.

[9] 韩俊英, 刘成忠. 自适应混沌果蝇优化算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33(5): 1313-1316.

[10] 张勇, 夏树发, 唐东生, 等. 果蝇优化算法对多峰函数求解性能的仿真研究 [J]. 暨南大学学报, 2014, 35(1): 82-87.

[11] 雷秀娟, 史忠科, 周亦鹏. PSO 优化算法演变及其融合策略 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(7): 90-93.

[12] 靳其兵, 赵振兴, 苏晓静, 等. 基于粒子健康度的快速收敛粒子群优化算法 [J]. 化工学报, 2011, 62(8):

2328-2333.

作者简介:

王素宁(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电技术;

潘三博(1974), 副教授, 硕士生导师, 主要研究可再生能源光伏发电及储能技术、高效率电力电子变换器、谐振逆变器等方面;

杨青斌(1988), 助理工程师, 主要研究方向为新能源发电及其并网检测;

林成栋(1991), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏逆变器设计。

(收稿日期: 2015-08-26)