

HVDC 换相失败判据及恢复策略的研究

艾 飞, 李兴源, 李 伟, 徐大鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:换相失败是指在换相电压反向之前未能完成换相的故障。它是高压直流输电系统最常见的动态故障, 为保证直流系统运行的安全、稳定性, 对换相失败现象进行深入研究是十分必要的。详细论述了换相失败的判据以及换相失败后应采取的恢复措施, 对于保证直流系统稳定运行具有一定的指导意义。

关键词:高压直流输电; 换相失败; 判据; 恢复策略

Abstract: Commutation failure means the fault that the commutation process is still uncompleted when the commutating voltage inverses. It is a dynamic fault that frequently occurs in high voltage direct current (HVDC) systems. In order to guarantee the safety and stability of HVDC's operation, it is necessary to research the commutation failure deeply. This paper presents the criterions and restoration measures after commutation failure, and it has the practical leading meaning for ensuring the stable operation of the HVDC systems.

Key words: HVDC; commutation failure; criterion; restoration measure

中图分类号: TM721.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)-04-0010-04

直流输电是电力技术与电子技术相结合的产物。由于其相对于交流输电的优点, 它是目前世界发达国家作为解决高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段^[1-3], 但高压直流输电系统 (HVDC Transmission System) 的投入在带来各种好处的同时也引进了新的问题, 换相失败就是换流站采用晶闸管作为换流阀元件所面临的常见故障之一^[4, 5]。

HVDC 换相失败的主要原因是由于交流电压幅值降低、直流电流突增或交流换相电压过零点偏移等^[6, 7]。通常发生一次换相失败的后果并不严重, 但如果恢复过程不顺利而发生后续的换相失败, 将最终导致直流传输功率中断, 甚至导致整个交直流系统失去稳定^[8]。因此, 如何判定换相失败以及换相失败后采取怎样的策略恢复直流功率是个非常重要的问题。

1 换相失败的机理

换相失败是指在换相电压反向 (具有足够的去游离度) 之前未能完成换相的故障^[9]。换相期间各参数之间的相互关系可以用下式表示:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (1)$$

式中, γ 为关断越前角, 简称为关断角; β 为触发越前角; μ 为换相角。 γ 直接决定于 β 和 μ 。

换流器的阀是一种可控电力电子开关, 它需要一定时间完成载流子复合, 恢复正向阻断能力, 其去游离恢复时间在 $400 \mu\text{s}$ (约 7° 电角度) 左右, 考虑到串联元件的误差, 晶闸管的恢复时间以电角度 γ_{min} 表示约为 8° 。所以在实际运行中, 当 $\gamma \leq 8^\circ$ 时就认为换相失败^[10]。由于整流器阀在电流关断后的较长时间内处于反电压下, 所以仅当触发电路发生故障时, 整流器才会发生换相失败。而对于逆变器, 由于换流阀关断后的恢复时间较短, 所以其更容易发生换相失败。直流输电系统的大部分换相失败发生在逆变器。

2 换相失败的判据

2.1 熄弧角判断法

熄弧角判断法是通过比较换流器熄弧角与引起换相失败的临界熄弧角之间的大小来判断发生换相失败的方法。该法是以换相失败的本质来判断换相失败的, 它主要应用于 EMTF 等电磁暂态仿真软件里晶闸管的建模^[11]。由上所述, 由于换相失败主要发生在逆变器, 所以主要讨论逆变器发生换相失败的情况。实际运行时, 触发超前角 β 是由直流控制器决定

基金项目: 国家自然科学基金资助项目: 505954, 12&50577044

的,而换相角 μ 则取决于多个因素,如下式所示^[12]:

$$\mu = \beta - \arccos\left[\cos\beta + \frac{\sqrt{2}I_d X_c}{E}\right] \quad (2)$$

式中, I_d 为直流电流; X_c 为换相电抗; E 为换相电压有效值; β 为触发越前角。所以,当交流系统对称时,逆变器的关断角为:

$$\gamma = \arccos\left[\cos\beta + \frac{\sqrt{2}I_d X_c}{E}\right] \quad (3)$$

当逆变侧交流系统发生不对称故障时,交流线电压的过零点将会移动,此时,逆变器的关断角为:

$$\gamma = \arccos\left[\cos\beta + \frac{\sqrt{2}I_d X_c}{E}\right] \quad (4)$$

式中, φ 为线电压过零点的相位移。当过零点前移时, γ 将减小。上述两种情况下,当 $\gamma < \gamma_{min}$ 时,就可判定逆变器换相失败。

文献 [13] 对整流器和逆变器在交流系统发生不对称故障、三相换相电压不平衡时的电流和电压波形进行了详细分析,通过对换流器换相过程中的实际熄弧角的计算来判定换流器是否发生换相失败。文献 [14] 根据三广直流鹅城换流站现场的暂态故障录波图中关断角的大小判定该站发生了换相失败。

2.2 最小电压降落法

由阀侧交流电压幅值的降落引起的换相电压的下降是影响换相失败的最原始的原因^[15]。由文献 [16] 可知,直流输电系统发生换相失败有一个最小换相电压降落(临界电压降落)。最小电压降落法通过比较换相电压的降落与发生换相失败所需的最小换相电压降落之间的大小来判断系统是否发生换相失败。该法在含直流准稳态模型的机电暂态仿真程序中广泛使用。在换相齿面积一定,晶闸管触发时刻不变的情况下,当交流系统发生故障使换相电压下降时,势必导致换相持续时间延长,即换相角 μ 增大,熄弧角 γ 减小,从而可能引起换相失败。

当交流系统对称,系统满载时,临界换相电压降落用 ΔE 表示为:

$$\Delta E = 1 - \frac{I'_d X_{cqm}}{I_d X_{cqm} + \cos\gamma_{min} - \cos\gamma} \quad (5)$$

式中, γ_{min} 为换流阀固有极限熄弧角; γ 为直流系统额定熄弧角; I_d 为直流电流; I'_d 为当关断角 γ 达到极限熄弧角 γ_{min} 时的直流电流; X_{cqm} 为换相电抗的标么值。

当交流系统发生不对称故障时,换相电压幅值降低的同时其过零点将会发生漂移。在换相齿面积一

定,晶闸管触发时刻不变的情况下,若过零点前移,就会导致换相角 μ 增大,熄弧角 γ 减小,引发换相失败。在这种情况下,当系统满载时,换相失败的临界换相电压降落 ΔE 表示为:

$$\Delta E = 1 - \frac{I'_d X_{cqm}}{I_d X_{cqm} + \cos(\lambda_{min} + \varphi) \cos\gamma} \quad (6)$$

式中, φ 为换相电压过零点的位移角度。

上述两种情况下,当换相电压下降大于 ΔE 时,就可认为发生换相失败。但该方法有准确性较差的缺点,这是因为 ΔE 是在下列假设条件下得到的^[17]:

- 1) 逆变侧交流系统是无穷大的,而在实际系统中,这个限值将会偏大;
- 2) 故障下电压波形是完整的,从而忽略了电压波形畸变对换相失败的影响。文献 [10] 和文献 [18] 针对单相接地故障,通过解析计算,利用电压变化来判别换相失败。

2.3 相位比较法

相位比较法是通过比较换流器阀侧交流回路中相电流和线电压之间相位关系的方法来判断换相失败。图 1 表示阀 V_1 、 V_3 在正常换相和换相失败之后相电流与线电压之间的相位关系的比较,从图 1 中可以看出未发生换相失败时,在线电压 V_{ab} 为正值的时间段内, a 相电流为负值。当发生换相失败之后,在线电压 V_{ab} 为正值的时间段内, a 相电流出现了正值。因此相位比较电路就发出信号,判定发生换相失败。

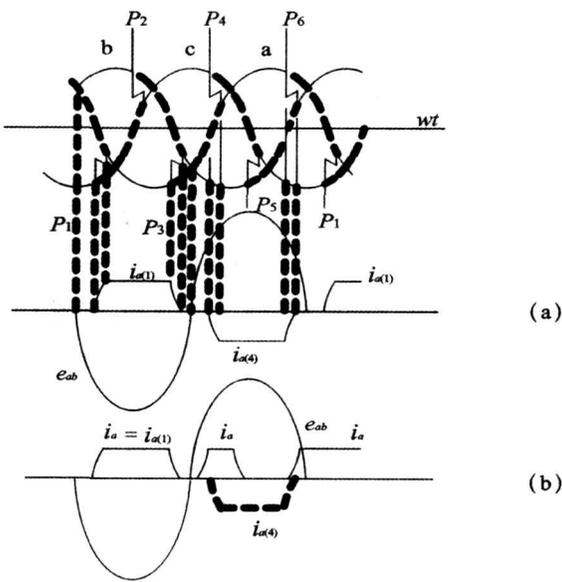
2.4 直流电压过零法

由于换相失败发生后,当下一个阀触发导通时,发生换相失败的阀组所在的换流桥直流侧短路^[19],换相失败后换流桥两端的直流电压有一时间段为零。图 2 为逆变器发生一次换相失败的电压波形示意图。换相失败发生在阀 6 向阀 2 换相的时候。在一次换相失败过程中,阀 6 导通长达一个周波(是正常运行情况的三倍),在阀 6 和阀 3 同时导通的时间 T 内 ($T=120^\circ + \mu$),直流电压为零。因此,可以将换流桥两端直流电压是否过零作为换相失败判据,即实时采样逆变器换流桥(一个六脉波桥情况)的直流电压,其值若大于零,则认为未发生换相失败,若某时间段其值为零,则认为逆变器换流桥发生换相失败,但该法偏于保守。

3 换相失败后的恢复策略

在许多情况下,由于直流系统整流桥的定电流调节器,直流线路上电抗器以及逆变桥上定关断角调

节器的作用可以限制直流电流的增大,从而减小了发生换相失败的概率,即使发生换相失败故障,一般情况下又可以自己恢复正常运行。但是,在一次换相失败的故障过程中,通过逆变桥直流线路电容的放电电流,在整流桥侧无法加以控制,而它将增大发生连续换相失败故障的概率,将使工频交流引入到直流系统。由于直流线路中对地电容及换流器出口平波电抗器的存在,将在直流回路中引起震荡,造成直流系统谐振过电压,并有可能导致直流线路闭锁、直流传输功率中断^[20]。所以为了避免一次换相失败后的连续换相失败,在一次换相失败后需立即采取故障控制措施,以使直流输电系统更顺利地恢复正常运行。



(a) 正常时; (b) 换相失败时

图 1 交流相电流与线电压的相位关系

3.1 增大换流阀触发越前角

在检测出逆变器发生一次换相失败故障后,故障控制装置立即增大触发越前角 β ,提前触发阀,如果换相失败中止, β 应该在数百毫秒后逐渐返回原值。如果换流器继续发生换相失败,则应该安排临时旁路,让电流通过旁路流通。

3.2 低电压限电流指令限制 (VDCOL)

低电压限电流指令限制 (VDCOL)的作用是在直流电压或交流电压跌落到某个指定值时对直流电流指令进行限制^[21, 22]。一次换相失败发生后,当电压很低而电流仍然很大时关断角很小,很容易再次发生换相失败。这时 VDCOL强制降低直流电流,利于逆变器换相,从而减小了发生后续换相失败的可能性。而且,它在减少直流功率的同时还减少了对交流系统无功的需求,有助于维持系统交流电压,同时有利于成功换相。

3.3 增发触发脉冲控制

增发触发脉冲是在发生一次换相失败后,改变逆变器触发脉冲的次序,提前触发后续的几个阀。通过改变换流器触发脉冲的次序可形成三相短路,较大的三相短路电流可以加速阀之间的换相过程,从而缩短事故时间,使得逆变器一次换相失败的直流短路时间,最大不超过基波周期。这样防止了阀不正常的长期导通,避免发展为更严重的故障。但如果交流系统太弱,这些控制措施可能会引起过大的扰动,就不宜采用^[23]。

3.4 采用保护控制措施

以上是针对一次换相失败故障的恢复措施,当故障严重以致发展成连续的换相失败时,可根据连续换相失败故障所产生的后果设置保护装置。

当发生连续换相失败时,会有如下三种故障结果:(1)阀的熄弧角小于某一设定值,如小于 δ_{min} ;(2)直流电流中所叠加的 50 Hz 分量超过整定值;(3)阀出口侧的直流电流 I_d 大于换流变阀侧三相电流 I_d 整定值。可利用上述结果组成 $\delta < \delta_{min}$ 保护,50 Hz 保护及换流器桥的差动保护,三种保护互为主后备保护。保护动作延迟一定时间,一般小于 200 ms 去启动阀控制系统紧急关闭 (ESOF) 程序^[24]。

如果逆变侧交流系统的故障很严重,逆变器发生多次连续换相失败而无法自行恢复,则应将换流阀闭锁和旁路,停止直流系统的运行,等交流电压恢复后,直流系统再开始启动、运行^[25, 26]。在交流故障切除后,应使直流功率尽快地恢复,以缓解交流系统功率的不

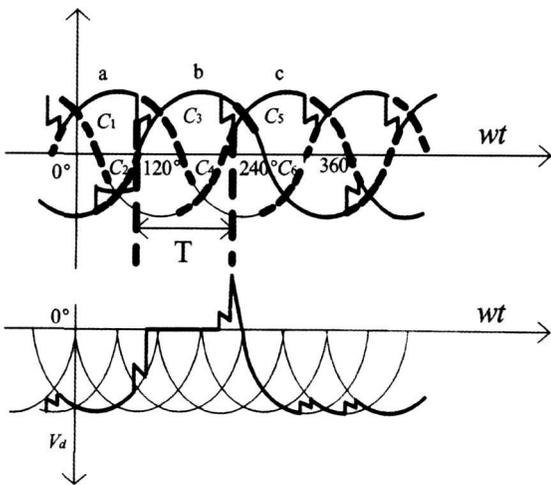


图 2 一次换相失败电压波形示意图
(阀 6 对阀 2 换相失败)

平衡。但弱交流系统难以提供足够的无功功率,如果直流功率恢复过快,系统会出现较高的暂时过电压和严重的电压畸变,这将造成继发性换相失败和交流系统的电压失稳^[27],文献[28]中提出了一种新的控制策略,它可避免出现这种情况,其思路是直接检测阀的反向阻断间隔,并于故障发生期间修改熄弧角的参考值。

4 结 语

换相失败是 HVDC 系统中最常见的故障,如何准确地判断换相失败,并在换相失败后采取适当的策略恢复正常运行是值得深入探讨的问题。前面对几种换相失败的判据及换相失败后的恢复措施作了详细论述,期望对 HVDC 系统的稳定运行有一定的理论参考价值及实际指导意义。

参考文献

[1] 卞守国,肖鸿江. 直流输电的优点和发展前景 [J]. 应用能源技术, 1998(1): 41-42.

[2] 田晖. 直流输电技术的特点及发展应用 [J]. 山东电力技术, 2003(1): 29-32.

[3] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2.

[4] 吴冲, 李兴源, 黄宗君. 高压直流输电系统换相失败及其相关问题研究 [J]. 继电器, 2007, 24(3): 1-5.

[5] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 38-41.

[6] Kristmundsson G M, Carroll D P. The Effect of System Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverter [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121-1128.

[7] 任震, 欧开健, 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.

[8] 孙志媛, 梁小冰, 孙艳. 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿真研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 295-298.

[9] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[10] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响 [J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60-62.

[11] Zou Gang, Zheng Jianchao. Study on commutation failure in HVDC inverter [J]. Proceedings of Power System Technology 1998, 503-506.

[12] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25

(14): 1-6.

[13] 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.

[14] 吕鹏飞, 王明新, 徐海军. 三广直流鹅城换流站换相失败原因分析 [J]. 继电器, 2005, 33(18): 75-78.

[15] 任震, 陈永进. 高压直流输电系统换相失败的概率分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 19-22.

[16] Thio C V, Davies J B, Kent K I. Commutation failures in HVDC transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.

[17] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 4-8.

[18] Ame H, Henk H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-1026.

[19] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.

[20] 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.

[21] 王珂, 杨卫东, 方勇杰, 等. 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略研究 [J]. 江苏电机工程, 2007, 26(1): 1-4.

[22] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响 [J]. 电网技术, 2005, 29(5): 20-24.

[23] 富强. 特高压直流输电换相机理的分析与仿真 [D]. 北京: 华北电力大学, 2006.

[24] 陈红军. 高压直流输电系统故障及控制策略 [J]. 华中电力, 2001, 14(5): 5-8.

[25] 任震, 欧开健, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究 (二)——避免换相失败的措施 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 6-9.

[26] Prabha Kunder. Power system Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001. 12.

[27] 杨卫东. 多馈入直流输电系统的控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.

[28] Sato M, Honjo N, Yanaji K. HVDC Converter Control For Fast Power Recovery after AC System Fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1319-1325.

作者简介:

艾 飞 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制, E-MAIL: aifei0312@163.com.

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

(收稿日期: 2008-06-15)