

直流输电系统换相失败探讨

朱韬析¹, 宁武军², 欧开健³

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 河南电力物资公司, 河南 郑州 450052;
3. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 换相失败是高压直流输电系统逆变器最常见的故障之一, 以天广直流输电系统为例, 简介南方电网采用德国 Siemens 直流输电技术的各直流输电系统中换相失败的检测、故障恢复及相关后备保护, 并结合实例和 RTDS 实时仿真初步探讨了换相失败故障过程中低压限流功能可能带来的不良影响、交直流混联系统间的相互影响等问题, 这不仅有助于直流输电系统运行维护工作, 还为交直流混联系统的进一步研究提供了有益的参考。最后还比较了 ABB 直流输电换相失败相关技术, 并提出了一些建议。

关键词: 直流输电; 换相失败; RTDS

Discussion on commutation failure in HVDC transmission system

ZHU Tao-xi¹, NING Wu-jun², OU Kai-jian³

(1. CSG EHV Power Transmission Company, GZ Bureau, Guangzhou 510405, China; 2. Henan Power Company, Zhengzhou 450052, China; 3. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Commutation failure is one of the most frequently occurred faults in inverter stations of HVDC transmission system. In this paper, the technology of detecting, recovery and backup protection of commutation failures adopted in HVDC transmission system of Southern Power Grid is introduced first, then, based on the operational cases and simulation results on RTDS, the negative influence of VDCL and the impact of multi-DC systems and AC system are discussed. All of these will be benefit to operation and maintenance of HVDC transmission system and the research on the security and stability of AC/DC hybrid system. At last, compared with the technology which ABB adopted, some useful suggestions are discussed.

Key words: HVDC; Commutation Failure; RTDS

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)23-0116-05

0 引言

换相失败是高压直流输电系统逆变器最常见的故障之一, 它将导致直流电压降低、输送功率减少、电流增大、换流阀寿命缩短、换流变压器直流偏磁及逆变侧弱交流系统过电压等不良后果; 若换相失败后控制不当, 还会引发连续的换相失败, 最终导致直流停运^[1-4]。而换相失败故障期间输入交流系统的电流发生了改变, 引起系统潮流方向发生变化, 还可能导致交流系统保护误动^[5-7]。因此, 迅速检测到换相失败并采取适当措施使直流输电系统尽快从故障中恢复, 对整个电网的稳定运行至关重要。

据统计, 天广直流输电系统仅在 2006~2007 年便发生了 14 次换相失败, 原因均为逆变侧交流系统故障。南方电网的天广、高肇、兴安直流输电工程控制系统主要采用了德国 Siemens 公司的技术,

本文首先以天广直流输电系统为例, 简介其换相失败的检测、故障恢复及相关后备保护, 并结合 RTDS 仿真进行了说明, 讨论了存在的一些问题, 然后还对比了 ABB 直流输电系统针对换相失败的检测和故障恢复措施, 最后提出了改进建议。

1 天广直流输电系统换相失败相关技术简介

1.1 换相失败的检测

根据换相失败的定义^[1], 如果阀电流结束时刻晚于对应的交流线电压过零时刻, 则该阀处于反向电压作用下的时间过短, 阻断能力未完全恢复, 在交流电压过零时刻后又承受正向电压, 此时即使不加触发也会再次导通, 从而出现换相失败故障。

天广直流极控系统根据上述基本定义检测换相失败, 阀电流结束时刻由该阀对应的可控硅电子设备测量, 经阀基电子设备送至极控; 对应的交流

线电压过零时刻则由极控根据换流变压器一次侧电压计算得到, 如果发现某阀电流结束时刻晚于对应的交流线电压过零时刻, 则判断出现了“换相失败”^[8]。

1.2 换相失败故障的恢复

使直流输电系统从换相失败中恢复的策略主要有^[1,4,9]:

(1) 增大正常运行时整定的关断角 r , 但这需要消耗更多的无功;

(2) 在检测到将要发生换相失败时, 将触发角 a 减小, 以增加换相裕度, 减少换相失败的发生;

(3) 检测到发生换相失败后, 相应的减小触发角 a , 使直流系统尽快从换相失败中恢复。

天广直流输电系统中采用了第三种方法: 检测到换相失败后, 通过将控制方式切为定熄弧角控制方式, 使直流系统从换相失败故障中恢复^[8]。

1.3 换相失败的后备保护

在天广直流输电系统中, 如果发生了连续换相失败, 总延时达到保护动作时限后, 首先通过保护出口将动作降低直流电流至 $0.3pu$ ——随着直流电流的降低, 换相失败的机率会大大减小; 如果换相失败是由于交流电压下降引起, 保护 I 段动作、降低电流后仍不能恢复正常, 经过更长时间的延时后, 将停运直流系统以免损坏设备。

2 运行、仿真案例及存在的问题

2.1 运行实例

图 1 为天广直流输电系统某次换相失败故障的录波。

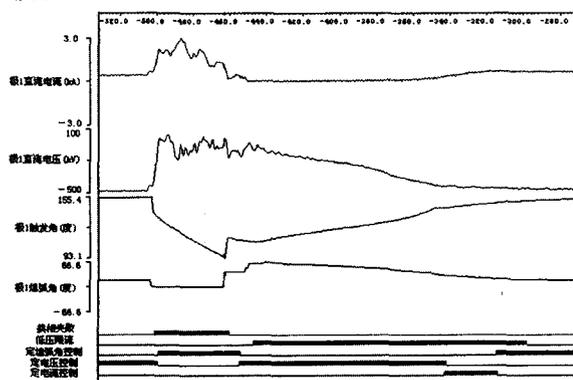


图 1 换相失败录波

Fig.1 Transient record of commutation failure

根据图 1, 可以证明, 通过控制系统本身的调节功能, 可以使直流输电系统从换相失败中快速自行恢复; 同时, 由于换相失败引起直流电压降低, 因此将启动低压限流功能 (VDCL)^[10], 直流系统

传输的负荷可能短时减少。

2.2 仿真实例

天广直流输电系统自投运以来, 逆变侧交流系统故障均能在较短时间内恢复, 为验证相关后备保护, 利用南方电网技术研究中心 RTDS 实时仿真系统^[11,12]进行了如下仿真:

(1) 模拟天广直流双极负荷 1000 MW、交流单相系统故障持续 300 ms, 故障录波如图 2。

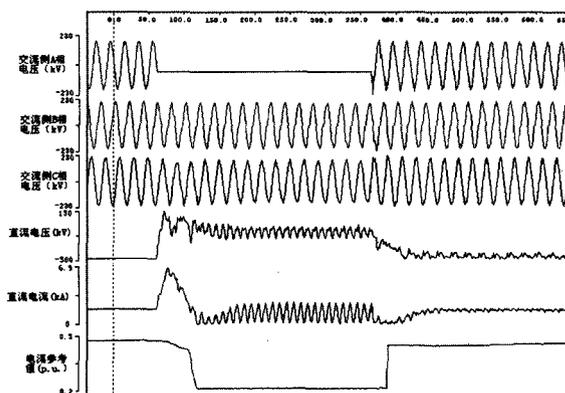


图 2 换相失败仿真录波

Fig.2 Simulation record of commutation failure

保护动作情况: 故障发生后 200 ms, 100 Hz 保护^[13]I 段动作。

根据录波, 故障发生后, 直流电压和电流中均出现较大的二次谐波分量, 达到延时后 100 Hz 保护动作; 但由于之前直流电压的下降已经启动低压限流功能 (VDCL) 降低了直流电流参考值, 所以 100 Hz 保护 I 段的动作并无影响。

(2) 模拟天广直流双极负荷 1000 MW、交流单相系统故障持续 1.1 s, 故障录波如图 3。

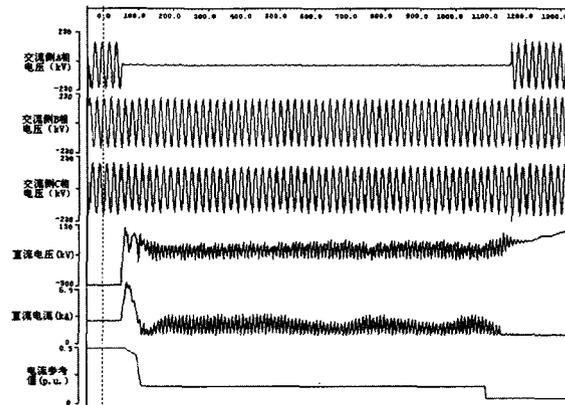


图 3 换相失败仿真录波

Fig.3 Simulation record of commutation failure

保护动作情况: 故障发生后 200 ms, 100 Hz 保护 I 段、II 段动作。

根据录波, 故障发生后, 直流电压和电流中均出现较大的二次谐波分量, 达到延时后 100 Hz 保护 I 段动作; 但同样由于之前直流电压的下降已经启动低压限流功能 (VDCL) [11] 降低了直流电流参考值, 所以 100 Hz 保护 I 段的动作并未造成影响。随后, 经 1 s 的延时后, 100 Hz 保护 II 段动作, 停运直流系统。

2.3 存在的问题

交流系统出现单相故障时, 直流电压和电流中会出现 100 Hz 分量, 根据这一特点, 构成了 100 Hz 保护 [13]。根据《中国南方电网 2007 年运行方式》的计算和分析, 交流系统故障, 如主保护或断路器拒动, 将可能引发单回或多回直流同时降功率或闭锁, 导致系统稳定破坏, 且无法通过安稳控制系统维持电网稳定。但对多数断路器拒动故障、失灵保护动作前, 如果直流输电系统不降功率, 电网便可以保持稳定。因此在断路器保护动作前, 直流 100 Hz 保护 I 段不宜动作。且鉴于断路器失灵发生的几率较高, 而且因断路器失灵导致多回直流同时降功率的动作后果比较严重, 考虑到开关拒动, 与失灵保护动作时间的配合, 故对天广和贵广 I、II 回直流系统 100 Hz 保护做如表 1 调整。

表 1 对 100 Hz 保护做的修改

Tab1 Modification of 100 Hz fundamental protection

保护	天广直流输电工程	贵广 I 回直流输电工程	贵广 II 回直流输电工程
100 Hz 保护 I 段	取消	取消	取消
100 Hz 保护 II 段	延时 3 s	≤3000 ms	≤3000 ms

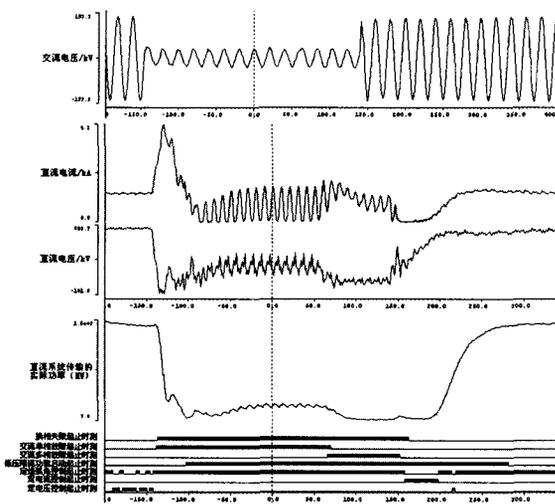


图 4 逆变侧换相失败录波图

Fig.4 Transient recorded curves of commutation failure in inverter side

但是, 根据上述仿真可以发现, 即使取消了 100 Hz 保护 I 段, 交流系统发生严重故障后, 直流输电系统仍可能由于直流电压的下降启动低压限流功能, 造成直流输电系统功率的降低。2008 年 07 月 30 日, 天广直流逆变侧交流系统发生严重故障, 故障录波如图 4。

仿真和实例都证明, 交流系统故障造成直流输电系统换相失败、直流电压降低后, 随即启动了低压限流功能, 将造成直流输电系统传输功率大幅降低, 而这无法通过安稳控制系统识别, 很可能对系统的稳定造成威胁。如何避免低压限流功能造成的直流系统传输功率降低对系统稳定、交流故障后系统快速恢复的不良影响, 还需要进一步的深入研究。

3 交流三相故障引起的换相失败

3.1 实例

2007 年 10 月 19 日 14: 08, 高肇直流输电系统因换流变压器故障导致单极闭锁瞬间, 天广直流输电系统也发生了一次双极换相失败, 逆变侧极 2 故障录波如图 5 所示。

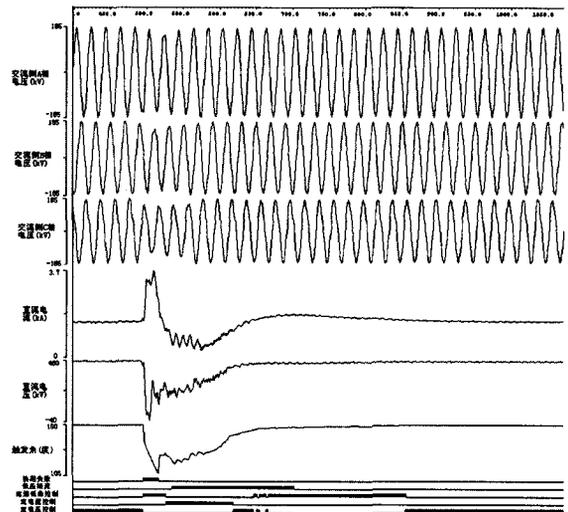


图 5 换相失败录波

Fig.5 Transient record of commutation failure

从故障录波图中可以看出, 交流三相电压都发生了一定的跌落, 这是一起比较典型的交直流混联系统相互影响的故障; 而对于交流系统三相故障引起的换相失败, 天广直流输电系统仍采用相同的检测手段。

3.2 ABB 直流输电系统换相失败相关技术简介

ABB 直流控制系统采用预测的方式检测换相失败: 当检测到交流系统故障可能引发换相失败时, 则在逆变侧触发角中减去一定角度, 实现提前触

发^[4,14]。

(1) 检测零序电压来检测单相故障

当逆变侧交流系统发生单相接地故障时, 逆变器交流侧电压中将出现零序分量:

$$u_0 = u_a + u_b + u_c \quad (1)$$

式中: u_0 为三相交流电压零序分量, u_a 、 u_b 、 u_c 分别为交流三相电压。如果 u_0 大于设定值, 则认为此时的交流系统故障将引起直流系统换相失败, 于是相应的将逆变侧触发电角减小。

(2) 通过Clark变换^[15,16]检测三相故障

通过 Clark 变换可以将三相交流电压用一个旋转矢量来表示:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

即:

$$U_\alpha = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}(U_b + U_c) \quad (3)$$

$$U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(U_b - U_c) \quad (4)$$

其中: u_a 、 u_b 、 u_c 分别为交流三相电压, u_α 和 u_β 为 $u_{\alpha-\beta}$ 矢量在 α - β 平面 α 轴和 β 轴上对应的分量, 三相对称分量经变换后在 α - β 平面得到一个以角速度 ω 旋转的矢量, 其幅值为:

$$U_{\alpha\beta} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \quad (5)$$

如果在时刻 t , 幅值 $u_{\alpha\beta}$ 与故障前该量的差大于设定值, 则认为将发生换相失败, 并将该差值转换为角度量, 相应的减小逆变侧触发电角。

3.3 结论

由“10·19”这一实例也可以看出, 单条直流的紧急停运, 不但会对交流系统造成不良冲击, 还可能引起其他直流输电系统发生换相失败等故障, 如果不能从换相失败中快速恢复、或者换相失败又引起了交流保护误动^[5-7], 这甚至将严重威胁到电网的稳定。随着南方电网直流输电系统规模的进一步扩大, 交直流系统之间的相互影响需要更深入的研究。而 ABB 直流输电系统采用的预测型定熄弧角控制策略, 其事先预防的思路从理论上来说, 可以更好地避免换相失败故障期间直流电流突增、直流电压降低、换流阀寿命缩短等一系列的问题, 建议有关部门对其进行深入的研究, 考察这种方法是否有助于直流输电系统更快的从换相失败故障中恢

复。

4 结语

(1) 仿真证明, 交流系统发生严重故障时, Siemens 直流输电系统通过 100 Hz 保护 I 段启动降电流、II 段停运直流系统; 出于系统稳定的考虑, 目前南方电网直流输电系统退出了 100 Hz 保护 I 段, 但是低压限流功能同样可能在这一情况下引起安稳系统无法识别的传输功率降低、对系统的稳定造成严重威胁。

(2) 在南方电网目前“强直弱交”的格局下, 单条直流的紧急停运很可能造成其他直流换流站交流母线的电压跌落, 从而引起多个直流输电系统同时发生换相失败, 这将对电网造成更严重的冲击, 如果直流输电系统不能从换相失败中快速恢复、或者换相失败又引起了交流保护误动^[5-7], 甚至会对电网稳定造成严重威胁。

(3) Siemens 直流输电系统根据换相失败的原理来检测, 采用了事后补救的措施——检测到出现换相失败后, 通过定熄弧角控制使系统从故障中恢复; 而 ABB 直流输电系统的换相失败相关技术主要采用了预测手段, 通过对交流系统故障的严重程度进行判断, 提前采取措施以避免换相失败。

虽然 ABB 直流输电系统采用的预测型定熄弧角控制策略同样不可能完全避免换相失败^[13], 而且其换相失败预测技术还存在一些难点和缺陷, 如换相失败的判断标准^[17]、未考虑阀丢失触发脉冲或直流电流增大等其他可能引起换相失败的因素等, 但其事先预防的思路从理论上来说, 可以更好地避免换相失败故障期间直流电流突增、直流电压降低、换流阀寿命缩短等一系列的问题。而且, 从运行经验来看, 交流系统故障是近年来引起换相失败最主要的原因, 因此, 建议考虑在天广、高肇及兴安直流输电系统中借鉴、参考 ABB 直流系统的换相失败预测技术, 进一步完善控制保护功能, 确保设备的安全和系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 水利电力出版社, 1985
- [2] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems[M]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957
- [3] Kristmundsson G M, Carroll D P. The effect of AC Systems Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverter [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121-1128

- [4] 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
CHEN Shuyong, LI Xinnian, YU Jun, et al. A Method Based on the Sin-Cos Components Detection Mitigates Commutation Failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (14): 1~6
- [5] 刘之尧, 唐卓尧, 张文峰, 等. 直流换相失败引起继电保护误动作分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 32 (19): 104-107.
- [6] 鲁德锋, 毛为民, 冼伟雄. 直流换流站换流失败引起继电保护不正确动作的分析及防范措施探讨[J]. 电力设备, 2006, 7 (1): 54-56.
LU Defeng, MAO Weimin, XIAN Weixiong. Discussion on Incorrect Action of Protection Caused by Commutation Failure in DC Converter Station and Its Countermeasures[J]. Electrical Equipment, 2006, 7 (1): 54-56.
- [7] 邵震, 王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32 (9): 42-45.
SHAO Zhen, WANG Bingyan. Analysis on Influence of HVDC Commutation Failure on AC Relay Protection[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (9): 42-45
- [8] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统换相失败分析及处理[J]. 高电压技术, 2008,(8):238-242.
ZHU Tao-xi, WANG Chao. Analysis and Recovery of Commutation Failure in Tian-Guang HVDC Transmission System[J]. High Voltage Engineering, 2008,(8):238-242.
- [9] 傅闯, 饶宏. 高压直流系统应对换相失败的定关断角控制策略[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (6): 17-22.
FU Chuang, RAO Hong. The Strategy of Gamma Control Over Commutation Failure for HVDC Transmission Systems[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2 (6): 17-22.
- [10] 朱韬析, 王超. 浅析天广直流输电系统的基本控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31 (21): 22-26.
ZHU Taoxi, WANG Chao. Analysis of the Basic Control Technique Used in Tian-Guang HVDC Transmission System. Power System Technology, 2007, 31 (21): 22 - 26.
- [11] 欧开健. 南方电网交直流混合仿真系统研究与实施 (一)——国内外电力系统非实时仿真技术分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (2): 24-29.
OU Kai-jian. Research and Application of the AC&DC Hybrid Simulation System in CSG Part One -- Analysis on the Non-real-time Simulation Technologies Worldwide[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2 (2): 24-29
- [12] 欧开健. 南方电网交直流混合仿真系统研究与实施 (二)——国内外电力系统实时仿真技术分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (3): 30-33
OU Kai-jian. Research and Application of the AC&DC Hybrid Simulation System in CSG Part Two--Analysis on the real-time Simulation Technologies in the World[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2 (3): 30-33.
- [13] 朱韬析, 张海凤. 天广直流输电系统非特征谐波保护简介[J]. 高电压技术, 2007, 32 (增刊): 69-71.
ZHU Tao-xi, ZHANG Hai-feng. Introduction of the Protections Based on Magnitude of Non-Characteristic Harmonics in Tian-Guang HVDC Transmission Project[J]. High Voltage Engineering, 2007, 32 (Supplement): 69-71.
- [14] Lidong Zhang, Lars Dofans. A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems[C]. 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings. Kunming, China, 2002: 51-56.
- [15] 焦邵华, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 用模糊集合理论识别电力系统振荡中的短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (6): 443-448.
JIAO Shao-hua, LIU Wanshun, YANG Qixun, etc. Study on the Discrimination Between Faults and Power Swings Based on Fuzzy Set[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (6): 443-448.
- [16] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (24): 57-60.
SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning; et al. A Novel Phase-mode Transformation Matrix[J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31 (24): 57-60.
- [17] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31 (1): 20-24.
HE Zhao-rong, LI Xing-yuan, JIN Xiao-ming, et al. Simulation Analysis on Commutation Failure Criteria for HVDC Transmission Systems[J]. Power System Technology, 2007, 31 (1): 20-24.

收稿日期: 2008-08-29; 修回日期: 2008-10-09

作者简介:

朱韬析 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

宁武军 (1970-), 男, 工程师, 从事电力物资管理及招标工作;

欧开健 (1974-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流系统仿真、交直流电力系统仿真分析。