

三广直流鹅城换流站换相失败原因分析

吕鹏飞¹, 王明新¹, 徐海军²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100085; 2. 国家电网公司惠州超高压管理处, 广东 惠州 516144)

摘要: 在简要介绍换相失败基本原理的基础上, 根据现场的暂态故障录波图, 对三广直流鹅城换流站发生换相失败的原因进行了详细分析。比较了在 ABB 直流控制保护系统中采用预测型关断角的前提下, 由于交流系统故障和丢失脉冲所引起换相失败的不同后果。最后提出了一种根据比较故障录波中关断角减小时刻和阀侧三相电流同时过零点时刻先后次序, 快速定位换相失败原因的方法, 对直流系统的现场运行具有一定的帮助和指导意义。

关键词: 直流输电; 丢失脉冲; 换相失败; 预测型关断角; 暂态故障录波

中图分类号: TM711 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2005)18-0075-04

0 引言

换相失败是高压直流 (HVDC) 输电系统最常见的故障之一, 它将导致逆变器直流侧短路, 使直流电压为零、直流电流增大、直流系统输送功率减少, 若换相失败后控制不当, 还会引发后继的换相失败, 最终导致换流阀寿命缩短、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^[1,2]。

三峡 - 广东直流输电工程北起湖北荆州江陵换流站, 南至广东惠州鹅城换流站, 全长约 960 km。本工程主要为解决三峡水电站向广东的电力输送以及实现华中与华南电网的非同步连接, 其中控制保护系统采用 ABB 公司的 mach2 系统^[3]。三广直流自投运以来, 鹅城换流站分别于 2004 年 6 月 25 日和 6 月 27 日发生两次换相失败。其中 6 月 25 日仅为极 1 发生换相失败, 6 月 27 日为双极均发生换相失败。由鹅城换流站提供的现场暂态故障录波 (Transient Fault Recorder) 可以看出, 6 月 27 日发生双极换相失败的原因是由于交流电压 A、B、C 三相均发生明显的畸变所导致。而 6 月 25 日极 1 发生的换相失败由 TFR 看不出交流电压有任何畸变, 发生原因不明, 此后, 鹅城站多次发生类似 6 月 25 日的换相失败, 因此本文将分析重点放在 6 月 25 日极 1 发生的换相失败上。

1 换相失败的基本原理

一个六脉动逆变器, 当两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内, 如果未能恢复阻断能力, 或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕, 在阀电压转变为正向时, 它

与原来预定导通的阀倒换相, 这称之为“换相失败”, 它使得逆变器在下一个阀开通时形成直流侧短路, 从而直流电压降低到零, 直流电流增大。

根据直流输电的基本原理, 触发角与触发超前角有如下关系:

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

式 (1) 中 α 为触发超前角, β 为触发角。

换相角 μ 的计算公式如下:

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

式 (2) 中 I_d 为直流电流; X_r 为换相电抗, E 为换相电压, β 为关断角。换相角与触发超前角和关断角的关系如下式所示:

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

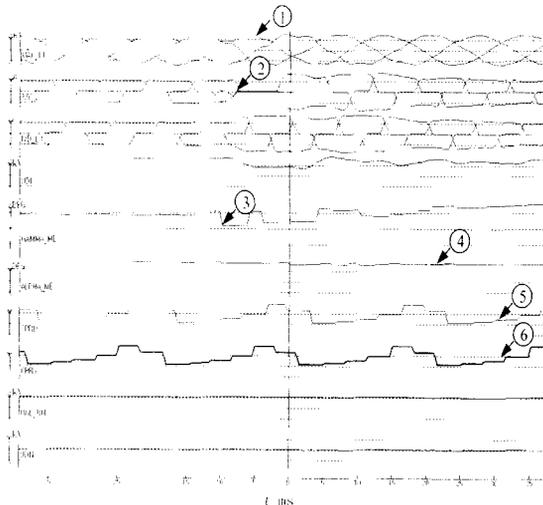
由以上分析可以得知造成换相失败的原因有: 交流电压下降, 直流电流增大, 交流系统不对称故障引起的线电压过零点相对移动, 触发超前角 α 过小、整定的熄弧角 β 过小^[4,5], 或者由于触发脉冲异常 (不触发或误触发) 导致阀不能按正常次序进行换相。

三广直流工程中 ABB 直流控制保护系统逆变侧采用预测型熄弧角。所谓预测型熄弧角, 即根据逆变侧触发角 β 计算出逆变侧的触发超前角 α , 然后根据三相交流电压、直流电流、换相电抗以及触发时刻计算出逆变侧换相重叠角, 最后根据式 (3) 得出逆变侧关断角^[6]。

2 6 月 27 日换相失败分析

6 月 27 日双极发生换相失败。极 1 TFR 录波图如图 1 所示。逆变侧单桥 6 脉动换流阀示意图如图 2 所示。

由图 1 可以看出,在点交流电压发生明显畸变,由式(2)可知交流电压降低将使逆变侧换相角增大,在触发角还未来得及调整的前提下,导致关断角大幅度降低,由点可知,测量的关断角(GAMA_ME)最低已降低到 3.2 度,并维持 3 ms 的时间,这势必导致逆变侧的换相失败。由 Y 接线换流单元交流侧电流(VY)可以看出,在点三相交流电流为零前,阀 4 换阀 2 发生换相失败一次,阀 5 开通时形成直流短路;得出此次换相失败是 Y 接线换流单元的阀 2 重新导通所致。



三相交流电压; Y/Y 换流变阀侧三相电流; 逆变侧熄弧角; 逆变侧触发角; D 阀触发脉冲; Y 阀触发脉冲(下同)。

图 1 6月 27 日鹅城站换相失败录波图

Fig 1 Wave of commutation failure in Echeng station on 27th, July

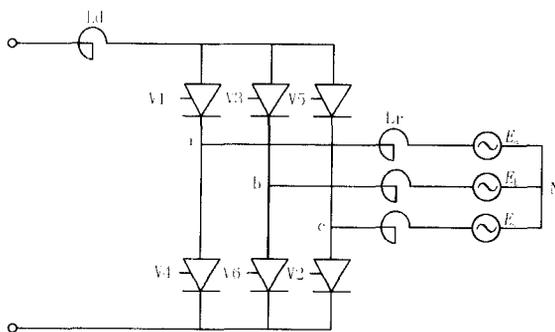


图 2 逆变侧单桥 6 脉动原理接线图

Fig 2 6-pulse bridge of inverter connection diagram

由录波图还可以看出此次换相失败发生时关断角首先减小随后发生换相失败,也就是在时间上点超前点,这说明由于交流电压的畸变,使关断角减小发生换相失败。再加之双极均发生换相失败,可以充分证明交流系统故障引起换相电压畸变的缘故最

终导致换相失败;因此,可以判断与控制系统无关。

由以上故障分析可以得出:ABB 控制保护系统采用预测型关断角,在逆变侧交流系统故障的情况下,由于换相电压畸变使实际关断角减小,根据交流电压预测的关断角也立即跟随减小。当实际的关断角减小到不能恢复正常控制时,发生换相失败,出现换流器交流侧三相电流为零;即,先出现关断角减小,再出现换流器交流侧三相电流为零。

3 6月 25 日换相失败分析

3.1 故障过程分析

6月 25 日仅极 1 发生换相失败,其 TFR 录波图如图 3 所示。

由图 3 可以看出,极 1 发生换相失败时交流电压波形基本正常,并未发生明显畸变现象。从直流电压仅下降一半,Y 接线换流单元交流侧电流(VY)看出,此换流单元换相正常,说明一个极十二脉动换流器,仅 D 接线一个六脉动换流器发生换相失败。

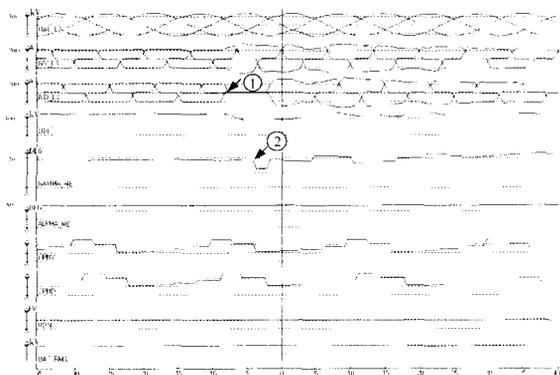
由 D 接线换流器阀侧电流可以看出,在点三相交流电流为零前,阀 4 向阀 6 换相时,阀 5 提前关断;根据换流原理分析,这种现象只能是阀 6 开通时,同时误发阀 3 脉冲,形成旁通对使直流短路,阀 4、阀 5 关断。在下一个阀 1 脉冲发出时刻,A 相电压低于 B 相电压,阀 1 不能开通与阀 3 换相。在阀 2 脉冲发出时刻,C 相电压低于 B 相电压,阀 2 开通与阀 6 换相,解除直流短路;阀 2 和阀 3 开通,B、C 两相接收直流电流。在阀 3 脉冲发出时刻,因阀 3 已经导通,无换相发生。在阀 4 脉冲发出时刻,A 相电压低于 C 相电压,阀 4 开通与阀 2 正常换相。在阀 5 脉冲发出时刻,B 相电压低于 C 相电压,阀 5 开通与阀 3 正常换相。此后,换流器恢复正常换相。

由图 3 可以看出,极 1 发生换相失败时交流电压波形基本正常,并未发生明显畸变现象,逆变侧关断角在点减小到 6.2 度并持续 1 ms 的时间。而发生换相失败阀侧交流三相电流同时为零时刻超前关断角减小的时刻 3 ms,也就是图上的点超前点 3 ms。通过 6 月 27 日换相失败的分析可知,如果是由于交流电压导致换相失败点必然超前点。从这一点上可以初步断定此次换相失败原因不是交流电压,而是控制系统脉冲异常。另外,由 TFR 交流侧三相电流可知,异常脉冲的阀是 D 阀的阀 3。阀 3 提前发出一个脉冲,造成单次换相失败。

3.2 与丢失脉冲故障比较

在江城直流进行系统调试期间,在进行有效系

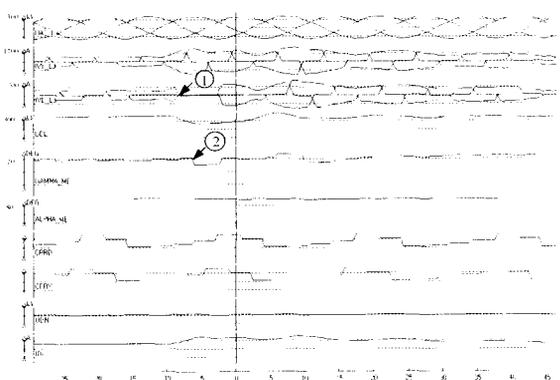
统切换试验过程中,由于系统的切换导致控制系统丢失脉冲发生换相失败。此种情况换相失败录波图如图 4 所示。



Y/D换流变阀侧三相电流; 逆变侧熄弧角。

图 3 6月 25日鹅城站换相失败录波图

Fig 3 Wave of commutation failure in Echeng station on 25th, July



Y/D换流变阀侧三相电流; 逆变侧熄弧角。

图 4 丢失脉冲引起换相失败录波图

Fig 4 Wave of commutation failure by missing pulse

由图 4 的换相失败波形我们看出,发生换相失败三相交流电流同时为零的时刻同样超前关断角减小的时刻 4 ms,即图上的点超前点 4 ms。此次换相失败的原因经中外专家讨论一致认为这是由于控制系统切换的过程中发生丢失脉冲所造成。

通过以上的对于 6月 25日极 1 发生换相失败与有效系统切换引起的换相失败的波形的比较可以看出,此两次换相失败的过程及现象及其相似,都是首先发生换相失败三相交流电流同时为零,而后引起预测型关断角的减小。

我们认为这种现象是由于 TFR 显示的关断角,并非系统测量得到的实际关断角,而是控制系统的计算值。采用 ABB 预测型关断角技术,只有在实际系统出现换相失败条件后,即出现逆变侧交流电压

降低,直流电流增加,根据相应公式计算出换相重叠角增大,在控制系统触发角还未变化时,计算出关断角的降低趋势。

由以上分析可以得出:ABB 的控制保护系统,在触发脉冲异常的情况下,尽管已经发生换相失败,出现了换流器交流侧三相电流同时为零实际工况,但是控制系统中预测型的关断角计算却是滞后的,只能根据换相失败引起的直流短路和直流电流增加才会显示出关断角的减小。

4 换相失败原因分析

综上所述,我们可以通过比较发生换相失败三相交流电流同时为零的时刻和关断角减小时刻的先后顺序,初步断定换相失败是由于交流系统电压引起的,还是由于控制系统脉冲异常所引起的。若发生三相交流电流为零的时刻在关断角减小的时刻之后,那么换相失败的原因很有可能是由于交流系统故障电压畸变所引起;当然,同时要辅以观察交流系统电压波形。若发生三相交流电流同时为零的时刻在关断角减小的时刻之前,同时交流电压波形并未发生明显畸变,那么换相失败的原因极有可能是由于控制系统脉冲异常所引起。

另外一点,通过以上波形可以看出,对于 ABB 的 mach2 系统由故障录波 TFR 中控制脉冲 (CP) 逻辑并不能判断系统是否真正丢失触发脉冲,以上 3 个丢失脉冲的 TFR 中 CPRY 和 CPRD 信号在换相失败时刻均正常。此 CP 脉冲逻辑只是触发脉冲发生器 (FPGA) 的输入逻辑,而真正去触发可控硅的脉冲是 FPGA 根据 CP 而产生的门脉冲 (GP) 信号。FPGA 除了产生正常触发脉冲外,还具有根据阀基电子回路返回的触发脉冲,决定投入的旁通对等其它功能;这其中经历多个环节,任何一个环节发生故障都会导致阀 GP 异常。

对于触发脉冲异常需要仔细查找故障原因。首先通过查看触发脉冲光缆接头是否清洁、接触是否良好排除丢失脉冲的异常现象。然后,需要分析触发脉冲发生逻辑和阀基电路,找出阀 3 触发脉冲为何同阀 6 触发脉冲一同发出的原因。

5 结论

通过以上分析我们可以得出以下结论:

a 6月 27日双极发生换相失败是由于交流系统故障,引起换相电压畸变所导致。

b 6月 25日极 1 发生换相失败极是由于控制

系统脉冲异常,误投旁通所引起的。

c 此分析结果提交给三广直流鹅城换流站,得到设备承包商 ABB 的认同,认为脉冲发生逻辑存在问题,正在研究解决。

另外,本文从预测型熄弧角基本原理出发,结合现场实际波形,分析得出一种比较实用的判断换相失败原因的方法,引发换相失败的原因可以归结为交流系统电压畸变或者直流控制系统脉冲异常,根据比较发生换相失败后三相交流电流同时为零的时刻和关断角减小时刻的先后顺序可以快速判断引起换相失败的原因。此方法对现场工作人员快速定位故障原因及分析故障具有一定的指导和帮助作用。

参考文献:

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京:电力工业出版社,1982
Zhejiang University HVDC Research Group. DC Power Transmission [M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982
- [2] 戴熙杰. 直流输电基础 [M]. 北京:水利电力出版社,1990
DAI Xi-jie. Basic Theory of DC Power Transmission [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990
- [3] 赵皖君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2004
ZHAO Wan-jun. HVDC Engineering Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004
- [4] ZHANG Li-dong, Dofans L. A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems [J]. IEEE, 2002
- [5] ZHANG L D, Bollen M H J. Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (4): 827-832
- [6] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2): 946-2957

收稿日期: 2005-01-05; 修回日期: 2005-04-11

作者简介:

吕鹏飞 (1979 -),男,工程师,从事直流输电、轻型直流输电控制保护及动模试验的研究工作; E-mail: phelimlv@epri.ac.cn

王明新 (1954 -),男,高级工程师,长期从事直流输电控制保护及动模试验的研究工作;

徐海军 (1977 -),男,工程师,长期从事直流输电现场检修工作。

Analysis of commutation failure reason in Three Gorges-Guangdong HVDC system Echeng station

L üPeng-fei¹, WANG Ming-xin¹, XU Hai-jun²

(1. Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

2. Huizhou EHV Administration, State Grid Corporation of China, Huizhou 516144, China)

Abstract: On the basis of the introduction of commutation failure principle, analysis of commutation failure in Three Gorges-Guangdong HVDC system Echeng station is made according to the transient fault record. This paper compares the commutation failure different results caused by AC system fault and missing pulse in the condition of prediction extinguish angle in ABB HVDC control and protection system. Finally, it puts forward a method of distinguishing the commutation failure reason by comparing the time of reducing extinguish angle and the time of 3-phase current of valve side crossing zero at the same time, which is helpful to the operator in HVDC system station.

Key words: HVDC; missing pulse; commutation failure; prediction extinguish angle; transient fault recorder

许继牌干式变压器荣膺“中国名牌”

9月1日下午,中国名牌战略促进委员会在北京人民大会堂召开表彰会,对获得2005年中国名牌产品的企业及获得中国世界名牌产品的企业颁奖。许继集团有限公司的许继牌干式变压器荣获“中国名牌”称号。

今年全国共有461家企业的501种产品获得“中国名牌”。其中河南省有15家企业的15种产品获奖,是历年来河南企业荣获“中国名牌”最多的一年。据了解,“中国名牌”从2002年开始评选,截至目前,河南省共有33家企业拥有中国名牌产品。