

# 阀组差动保护异常导致直流特高压阀组 闭锁事故分析

孙文禹 佳 闫礼阳

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

**摘要:** 根据国内某特高压换流站阀组连接线差动保护Ⅱ段动作,导致极Ⅱ高端阀组闭锁的事故,通过理论详细分析其原因,查找出控保软件中故障的根源,并提出自己的合理化建议。不但对于此特高压换流站,同时对于国内其他换流站也具有极大的借鉴意义。

**关键词:** 特高压直流; 阀组差动保护; 逻辑识别; BPD 刀闸

**Abstract:** According to the valve group tripping fault of high-end pole Ⅱ caused by differential protection Ⅱ action of connecting line of valve group in a domestic UHVDC converter station, the reasons are analyzed in detail through the theoretical analysis. The root cause of the failure in the control and protection software is found out, and the reasonable suggestions are put forward. It is not only a significant reference for UHVDC converter station, but also for other converter stations in China.

**Key words:** UHVDC; differential protection of valve group; logic identification; BPD isolation switch

中图分类号: TM72 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2016)06-0070-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.016

## 0 引言

在中国,±800 kV 特高压直流输电技术采用双极双12脉动换流器串联运行的主接线形式。考虑到单阀组运行、双阀组运行、三阀组运行等多种组合形式,特高压直流输电共计有45种正常运行方式。为了有效提高直流输电的可靠性,特高压直流配置了单12脉动换流器在线投退控制策略,用以对故障退出运行的单12脉动换流器进行隔离检修,以最大限度地避免极/双极强迫停运风险,利用极间功率补偿功能最大限度地减少功率损失<sup>[1-4]</sup>。

然而,现场工作经验却表明,特高压直流输电单阀组在线投退功能存在着部分缺陷,导致投退失败,甚至导致正常运行阀组误退出等情况,引发业界广泛关注。2016年2月28日,某特高压换流站极Ⅱ低端阀组隔离开关正常操作过程中,极Ⅱ阀组连接线差动保护Ⅱ段动作,极Ⅱ高端阀组闭锁。此次事件虽未造成直流功率损失,但对特高压直流安全稳定运行造成了极大的威胁。

在此背景下,基于特高压直流在线投退策略,对“2·28”事故进行详细分析,查找出故障的根源,对其他换流站今后的运维工作具有极大的借鉴意义。

## 1 特高压直流在线投退原理<sup>[5-6]</sup>

特高压直流工程阀组的投入与退出,应以不中断另一阀组的正常运行;同时对直流功率输送带来的扰动应尽量小为原则,以避免对整个电网带来过大的冲击。站间通讯正常时,阀组投入退出命令由主控站发出,两端换流站之间通过相互协调的控制时序实现阀组平稳投退。

### 1.1 在线投入原理及时序

有站间通讯时,换流器允许投入的前提是极单阀组运行,且两站本极另一阀组均处于热备用状态(ready for operation, RFO)。投入顺序如下:

1) 主控站发出换流器投入命令,投入的换流器立即解锁,解除移相,定电流调节器的电流定值为 $I_{DNC}$ 实测值。在定电流调节器作用下,触发角逐渐下降,通过换流器的电流逐渐增大;当通过换流器的电流与 $I_{DNC}$ 相等时,触发角约为 $90^\circ$ 左右,此时拉开换流器旁通开关,直流电流完全转移至换流器。

2) 非主控站通过站间通讯收到主控站投入换流器命令信号后,与主控站同样操作,解锁阀组,调节换流器电流,拉开旁通开关。

3) 逆变侧投入的换流器在电压调节器的作用

下提升直流电压,整流侧维持直流电流为极控制电流指令值。

4) 直流电压和直流电流都达到指令值,换流器投入完成。

其投入过程的逻辑框图,如图 1 所示。

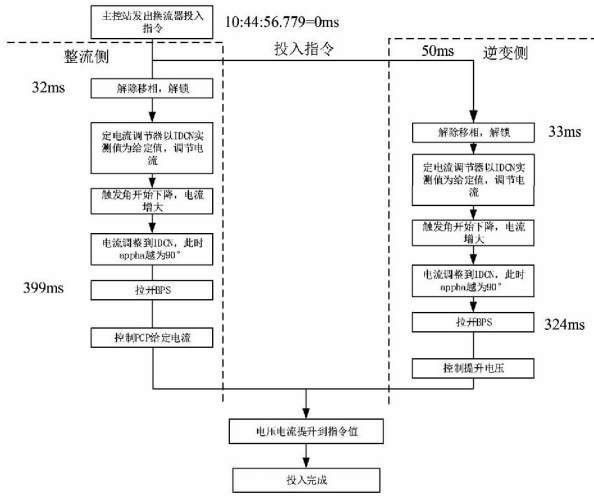


图 1 在线投入逻辑框图

无站间通讯时,两站运行人员通过电话沟通,整流侧先发换流器解锁命令,解除移相,升换流器直流电流达到  $I_{DNC}$  后,拉开旁通开关;整流侧两换流器均进入定电流控制,等待逆变侧换流器投入;逆变站运行人员发出换流器解锁命令后,解除移相,升换流器直流电流达到  $I_{DNC}$  后,拉开旁通开关;随后逆变侧提升直流电压,整流侧维持直流电流,换流器投入完成。整流、逆变两站解锁的时间间隔不能大于 5 s。

### 1.2 在线退出原理及时序

有站间通讯时,换流器允许退出的前提是极双阀组运行。退出顺序如下:

1) 主控站的换流器退出命令后立即执行触发角调整到  $90^\circ$  (ALPHA90) 操作,ALPHA90 后执行投旁通对操作,合换流器的旁通开关,然后闭锁该换流器;

2) 非主控站通过站间通讯收到主控站退出换流器命令信号后,与主控站同样操作,立即执行 ALPHA90 操作,ALPHA90 后执行投旁通对操作,合换流器的旁通开关,然后闭锁该换流器;

3) 本极另一换流器继续运行,两站协调维持电流电压在指令值附近,换流器退出完成。

其退出过程的逻辑框图,如图 2 所示。

无站间通讯时,某站单换流器故障退出,对站通过换流器不平衡保护功能自动退出本极低压换流器。当本站双阀组运行,且直流电压在 0.35 ~ 0.65 p. u.

之间,换流器不平衡保护判别对站换流器已退出时,将延时退出本站的低压换流器。

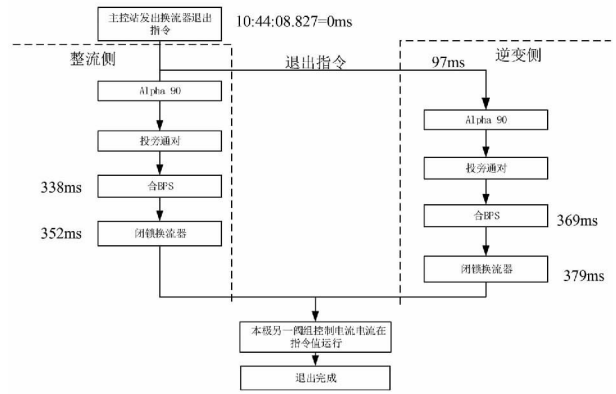


图 2 在线退出逻辑框图

## 2 事件记录及故障录波分析

### 2.1 事故概述

故障前,某特高压直流双极四阀组大地回线方式运行,输送功率 4 000 MW。故障后,极 I 单极大地方式运行,输送功率保持 4 000 MW。11:17:10:576 运行人员操作,发出极 II 低端换流器隔离指令,但在 11:17:31:795 阀组连接线差动保护 2 段动作“三取二”判断后发出 Z 闭锁命令,极 II 高端阀组闭锁。由于直流半功率运行,极 I 成功转带极 II 功率,未导致直流功率损失。

事后检查,极 II 高端阀组未发现故障点,此次事件应该是由控制保护系统缺陷导致的误动事件。

### 2.2 主要事件记录

事件具体记录如表 1 所示。

### 2.3 故障录波分析

阀组连接线差动保护的基本原理如下:

报警段:  $|I_{DC2P} - I_{DC1N}| > I_{D\_NOM} \times 0.0375$ ,延时 2 s 报警。

跳闸 I 段:

$|I_{DC2P} - I_{DC1N}| > |I_{DC2P} + I_{DC1N}| \times 0.5 \times 0.1$ ,延时 150 ms 跳闸。

跳闸 II 段:

$|I_{DC2P} - I_{DC1N}| > |I_{DC2P} + I_{DC1N}| \times 0.5 \times 0.2$ ,延时 6 ms 跳闸。

事件发生期间,保护动作时刻的差动电流和制动电流波形如图 3 所示。

表 1 事件记录梳理

时间	主机	事件	备注
11:17:10:576	S2P2CCP2A	运行人员操作,发出极 II 低端换流器隔离指令	
11:17:31:476	S2P2CCP2A	P2. WP. Q15(80226) 合位	控制系统检测到阀组旁路刀闸已合上
11:17:31:522	S2P2CCP2A	P2. WP. Q2(8022) 分位	控制系统检测到阀组旁路开关已分开
11:17:31:781	S2P2PPR1(A/B/C)	阀组连接线差动保护 2 段动作"三取二"判断后发出 Z 闭锁命令	3 套保护均动作
11:17:31:795	S2P2CCP1A	极 II 高端阀组闭锁	

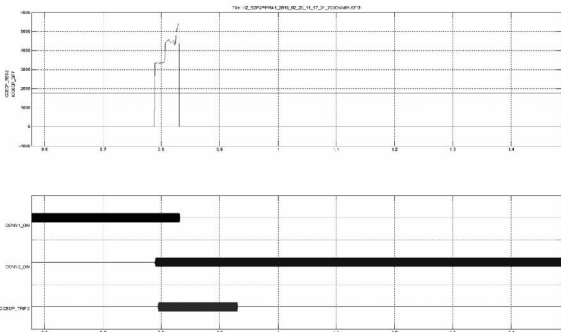


图 3 故障发生时刻差动电流波形图

从故障录波图分析,故障发生时,特高压换流站极 II 阀组连接线差动保护差动电流  $I_{CCBDP\_DIFF}$  由 0 瞬间变为 3 362 A,大于差动 II 段制动电流 1 750 A,满足保护动作条件。

从图 4 看出,当双阀组运行时,差动电流取高端阀组低压侧 TA 和低端阀组高压侧 TA 之差;当任一阀组退出后,差动电流取 0 A,该保护退出运行。

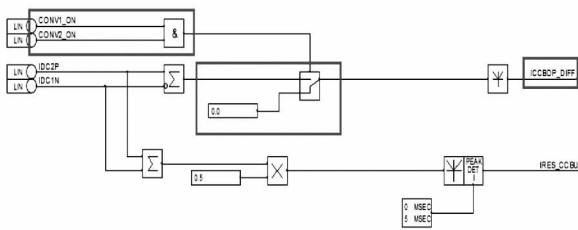


图 4 阀组连接线差动电流取样逻辑

### 3 直流控保软件检查分析<sup>[5-6]</sup>

此特高压换流站使用南瑞集团提供的直流控制保护软件,这也是特高压直流工程首次使用南瑞集团的直流控保软件。

保护动作、极 II 高端阀组闭锁后,检查发现该保护逻辑中  $CONV1\_ON = 0$ 、 $CONV2\_ON = 1$  (如图 5 所示),与实际状态不符,正常状态应为  $CONV1\_ON =$

0、 $CONV2\_ON = 0$ 。

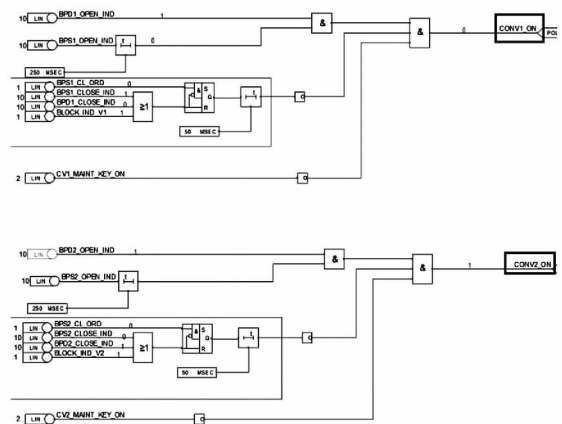


图 5 阀组运行状态识别逻辑

由此推断,BPD2(P2. WP. Q15)合上后,阀组连接线差动保护仍判该刀闸为分位,误判低端阀组在运行状态( $CONV2\_ON = 1$ ),同时高端阀组处于运行状态( $CONV1\_ON = 1$ ),导致该保护选择  $I_{DC2P}$  和  $I_{DC1N}$  进行差动电流的计算,此时  $I_{DC2P}$  电流为 0,  $I_{DC1N}$  为运行电流(3 362 A),造成阀组连接线差动保护动作。

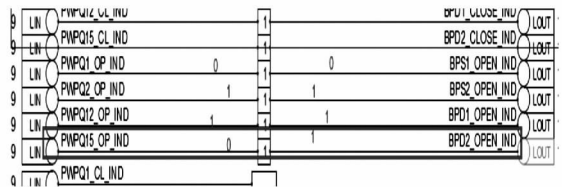


图 6 低端阀组旁路刀闸运行状态输入

进一步检查发现软件信号异常如图 6 所示。正常情况下,赋值模块(即图 6 中  $\rightarrow 1 \leftarrow$ )输出与输入应一致,但图中显示输入信号  $PWPQ15\_OP\_IND = 0$ ,输出信号  $BPD2\_OPEN\_IND = 1$ ,输出信号与输入信号不一致。现场检查发现 3 套极保护中均存在该情况。

经分析,发现导致 BPD2 分位信号错误的原因

(下转第 77 页)

Technique for Incipient Fault Diagnosis in Power Transformers: A Bibliographic Survey [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(6): 41-46.

[2] Naveen Kumar Sharma, Yog Raj Sood, Rajnish Shrivastava. DGA Analysis of Transformer Oil with Experimental Investigation: An Effective Tool of Condition Monitoring for Power Transformer [J]. Journal of Power Electronics & Power Systems, 2015, 5(2): 9-16.

[3] 高文胜, 严璋. 谈克雄基于油中溶解气体分析的电力变压器绝缘故障诊断方法 [J]. 电工电能新技术, 2000, 19(1): 22-26.

[4] 张建文, 赵大光, 董连文. 基于模糊数学的变压器诊断专家系统 [J]. 高电压技术, 1998, 24(4): 6-8.

[5] 李硕, 赵峰. 基于熵权优化加权灰色关联度的变压器故障诊断方法 [J]. 变压器, 2013, 50(9): 48-51.

[6] 张吉林, 李守学, 邹姗姗. 基于灰色关联度的变压器故障诊断 [J]. 变压器, 2015, 43(1): 13-15.

[7] 段侯峰. 基于遗传算法优化神经网络的变压器故障诊断 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[8] 武中利, 杨建, 朱永利, 等. 基于粗糙集理论和支持向量机的变压器故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 80-82.

[9] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[10] 王清印. 灰色B型关联分析 [J]. 华中理工大学学报, 1989, 17(6): 77-82.

[11] 孙才新, 李俭, 郑海平. 基于灰色面积关联度分析的电力变压器绝缘故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2002, 26(7): 24-29.

作者简介:

胡非(1985), 工程师、硕士研究生, 主要从事继电保护工作;  
干磊(1983), 工程师、硕士研究生, 主要从事继电保护工作。  
(收稿日期: 2016-06-14)

(上接第72页)

是 BPD2\_OPEN\_IND 输入信号的底层代码错误, 误将 BPD2 分位信号( PWPQ15\_OP\_IND) 定义为 BPD2 合位信号( PWPQ15\_CL\_IND) , 如图 7 所示。



图7 信号内部定义错误

根据上述现象分析, 故障原因为软件底层代码错误, 引起阀组连接线保护差动电流选择错误, 导致保护动作。

### 4 故障处理及建议

1) 经检查, 此特高压直流阀组连接线差动保护均存在 BPD2\_OPEN\_IND 信号与实际状态不符的情况, 如现场实际状态为分位, 但软件中信号为合位。建议直流控制保护供货厂家开发编译软件自检功能, 当信号实际输入与自定义输入出现差异时, 软件能够自动报警, 确保其余信号无类似问题。

2) 经南瑞集团检查确认, 现场软件中仅 BPD2\_OPEN\_IND 信号存在底层代码错误问题, 其他极控、阀控、极保护、阀保护等软件中均无类似错误。建议厂家在编写软件和自行监测过程中切实提高检查力度, 同时在出厂试验、现场调试中能够对软件进行全面的试验和检查。

### 参考文献

[1] 郑晓冬, 郇能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.

[2] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.

[3] 浙江大学发电教研组直流输电教研组编. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.

[4] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[6] 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:

孙文(1980), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;  
禹佳(1983), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;  
闫礼阳(1968), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。  
(收稿日期: 2016-08-02)