

高压直流控制与保护系统配合不当分析

田庆¹, 王晓希²

(1. 国网运行有限公司宜昌超高压管理处, 湖北 宜昌 443005; 2. 国网运行有限公司, 北京 100005)

摘要: 研究了葛南直流控制保护系统改造完成后遗留下来的一个隐患,分析了葛洲坝换流站一次双极停运事故的现象,根据绝对最小滤波器组不满足的条件,指出无功控制与交流滤波器保护配合不当是这次事故的主要原因,同时找出有功功率回降软件功能不完善之处,最后给出了相应的解决办法,为将来更好地实施直流控制保护系统国产化改造提供参考。

关键词: 高压直流; 控制; 保护; 配合不当

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0432-03

Analysis of the Mismatch of HVDC Control and Protection System

TIAN Qing¹, WANG Xiao-xi²

(1. Yichang Extra High Voltage Administrative Bureau, State Grid Operation Company Limited, Yichang 443005, China;
2. State Grid Operation Company Limited, Beijing 100005, China)

Abstract: This paper studies the incipient fault after the completion of the home-produced Genan HVDC control and protection system. It is found that the mismatch between reactive power control and AC filter protection in Gezhouba converter station led to an out of service fault of the Genan HVDC, and one bug in active power control software is also discovered. Some corresponding methods are put forward for the better accomplishment of the home-produced HVDC control and protection system.

Key words: HVDC; control; protection; mismatch

0 引言

控制保护系统是直流输电工程的大脑神经系统,除安全准确输送功率等基本控制策略外,还有多种为满足交直流系统动态性能要求的控制策略、保护性监控和帮助用户自愈的功能,充分体现了直流输电高速和灵活有效的控制策略。葛洲坝至南桥±500 kV 直流输电工程两极分别于 1989 年和 1990 年投入运行。自 2002 年起至 2005 年 4 月,葛南直流控制保护系统实施了国产化改造,并且获得了巨大成功^[1]。然而,在改造过程中,由于时间紧、任务重,在某些细微处,厂家技术人员没能全面的考虑各种故障情况,对控制和保护之间的配合校核不够严密,给葛洲坝换流站的安全运行埋下了隐患。

2007 年 2 月 26 号,运行人员投切交流滤波器时,由于交流滤波器电抗器过负荷保护与控制系统无功功率控制(RPC)配合存在问题,并且紧急功率回降没能启动,HP11/13 交流滤波器过负荷保护动作,导致四组 HP11/13 交流滤波器均退出运行,绝对最小滤波器组(Abs Min Filter)不满足,直流系统双

极闭锁。当时葛站交流系统运行工况见图 1。图 1 中黑色方框表示系统相应开关刀闸为合位,白色方框表示为分位。图中相关设备刀闸、地刀已省略。葛洲坝换流站双极运行,功率 695 MW,两组 HP11/13 交流低通滤波器(5051、5053)和两组 HP24/36 交流高通滤波器(5011、5013)运行,两组 HP11/13 交流低通滤波器(5031、5033)热备用。所有滤波器电路结构相同,见图 2。

2007 年 2 月 26 日 6:28,葛洲坝换流站双极全压正常运行,输送功率为双极 695 MW。运行人员按预定计划将 5053HP11/13 交流滤波器转入检修状态,在手动将 HP11/13(5053)交流滤波器切除时,OWS 发 5051HP11/13 交流滤波器电抗器 L₂ 支路上

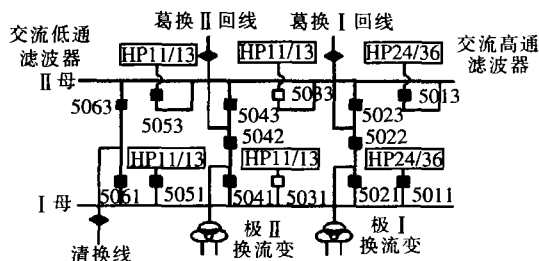


图 1 葛洲坝换流站故障前运行方式

收稿日期:2007-09-10; 修回日期:2008-03-23

作者简介:田庆(1976-),男,博士,研究方向为高压直流输电和特高压交流输电运行检修技术。

过负荷 I 段保护动作跳闸信号,5051HP11/13 交流滤波器退出运行。RPC 在 5053 手动切开后就发出自动投入 HP11/13 交流滤波器命令,经过延时后投入热备用的 5033HP11/13 交流滤波器,交流滤波器 HP11/13(5033)的电抗器 L_2 同样过负荷 I 段保护动作,5033HP11/13 交流滤波器退出运行。RPC 继续投入交流滤波器 HP11/13(5031),交流滤波器 HP11/13(5031)的电抗器 L_2 同样过负荷 I 段保护动作,5031HP11/13 交流滤波器退出运行。至此四组 HP11/13 交流低通滤波器 HP11/13 都不可用,双极直流系统因 Abs Min Filter 不满足而闭锁停运,双极直流系统 ESOF 退至热备用状态,极闭锁发出切除所有交流滤波器命令,5013、5011 开关三相分开。

1 故障分析

Abs Min Filter 控制保证了在一定功率水平时投入合适的滤波器组数,使设备的额定值得到满足,即使 RPC 在手动模式时也投入滤波器。如果 Abs Min Filter 组数不满足,RPC 将在预设时间之后降低直流功率直至停运直流系统。葛南直流改造后,交流滤波器校核研究基本上沿用在三常直流工程中采用的方法,采用 RPC 中的 Abs Min Filter 功能来代替原先葛南工程中的 QLACK 功能^[2]。改造后,为了满足无功补偿和交流侧滤波的基本需求,也就是满足 Abs Min Filter,葛洲坝站双极平衡运行方式下,制定了直流输送功率与交流滤波器组数对应投切表,见表 1。交流滤波器替换原则为:当一组运行中的滤波器因故退出后,投入相同类型的滤波器对其进行替换,如无相同类型的滤波器,则按照滤波器投切顺序先后依次进行替换。可投入的交流滤波器组的隔离开关和地刀必须在适当的位置,而且锁定继电器未被置 1。如果交流滤波器组被保护跳闸,它的锁定继电器被置 1。只有在经过在一定的放电时间(10 min)后,锁定继电器经手动清 0,交流滤波器组才有可能被再次投入。

当 5053 手动切除后,5051、5031 与 5033 过负

表 1 满足绝对最小滤波器条件双极平衡方式运行交流滤波器投切表

运行方式	HP11/12.94	HP23.8/36.2	最大直流功率/MW	
			正送	反送
1	1	0	160	160
2	1	1	300	360
3	2	0	300	360
4	2	1	500	530
5	3	0	500	530
6	2	2	750	640
7	3	1	750	640
8	4	0	750	640
9	3	2	1 250	900
10	4	1	1 250	900
11	4	2	1 440	1 200

荷的情况基本相同,均为两组 HP24/36 高通滤波器加一组 HP11/13 低通滤波器的运行方式,这最多只能满足表 1 中方式 2 的 Abs Min Filter。而此时输送功率为双极 695MW,是表 1 中方式 6,在此方式下应至少保证系统有 2 组高通、2 组低通运行,Abs Min Filter 条件不满足,从而发生事故。可以看出,这次事故的主要原因有 2 个:交流滤波器电抗器过负荷保护动作过快;在不满足 Abs Min Filter 时,RPC 没有及时功率回降,而是直接双极停运。

1.1 保护定值和 RPC 配合不当

HP11/13 交流滤波器电抗器过负荷 I 段为过电流保护,计算公式为(计算电流为有效值): $I > I_{set}$ 。

5031、5033、5051、5053HP11/13 交流低通滤波器 I 段过流定值 I_{set} 为 360 A,延时 0.2 s 保护动作出口跳闸。

以 5031 为例,退出运行前谐波最大相(B 相)的分布图见图 3。可以看出,加在 5031 交流滤波器上的 11/13 次谐波电流增加,达到电抗器过电流保护 I 段定值,延时 0.2 s 后动作出口跳闸。

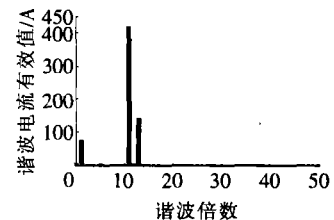
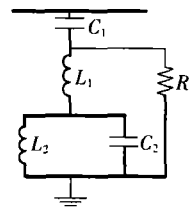


图 2 交流滤波器等效电路

图 3 保护动作前 L_2 谐波分布图

当 5053 手动切除后,还有两组 HP11/13 交流滤波器(5031、5033)可以投入运行,若 RPC 在 5051 过负荷保护动作之前就将 5033HP11/13 交流滤波器投入运行,那么图 3 所示的谐波电流就会在 2 个 HP11/13 交流滤波器(5051、5033)之间平均分布,HP11/13 交流滤波器(5051、5033)过负荷保护就不会动作,事故也就不会发生。然而,当运行滤波器切除后,RPC 自动投入备用滤波器需延时 0.4 s(不计控制系统执行元件和开关合闸的固有时间),而交流滤波器电抗器过负荷保护 I 段出口时间为 0.2 s,在这种条件下,无论是手动退出 HP11/13 交流滤波器,还是因为设备故障退出一组 HP11/13 交流滤波器,都会导致控制系统发 Abs Min Filter 不满足而闭锁直流系统。事故中 5053 手动切除后,RPC 检测到 Abs Min Filter 不满足,并在 653 μ s 内正确投入 5033 交流滤波器(HP11/13),但是 5051 交流滤波器(HP11/13)电抗器过负荷保护先于 5033 交流滤波器投入运行前出口,将 5051 交流滤波器切除。当轮流投切完所有 HP11/13 交流滤波器后,没有可用的 HP11/13 交流滤波器,Abs Min Filter 条件不满足,双极闭锁运行。

1.2 功率回降软件功能不完善

无论是在功率控制模式下还是在电流控制模式下^[3],紧急功率回降均能根据系统要求自动降低直流输送功率。控制保护系统改造完成后,启动功率回降的情况有:手动启动、保护启动、极平衡指令启动、阀温度启动、RPC启动。然而,厂家在改造过程中,由于交流滤波器故障类型较多,在校核过程中只选择了一些典型方式,没有考虑到这种交流滤波器过负荷保护相继动作的情况。

葛南直流控制保护系统国产化改造完成后,曾经进行过一次小功率无功控制试验,方法如下:

5053、5013在合位,5051、5033、5031、5011在分位,单极大地回线方式运行,功率310MW,首先降压至350kV,在降压过程中5051、5011自动投入,满足Abs Min Filter;将5033、5031开关打开,使其不可用,同时将RPC置为手动,切除5053后,只保留5051、5013和5011,15s后,功率开始回降,最终功率降至279MW(单极运行时Abs Min Filter与双极时不同)。

从小功率无功控制试验可以看出,厂家改造的RPC是具有功率回降功能的,然而根据其设计要求,Abs Min Filter不满足后需延时15s才进行功率回降。由于交流滤波器保护动作较快,在4s内依次切除完所有HP11/13,满足4组HP11/13交流滤波器都不可用时双极闭锁的条件,因此没有发生功率回降,而是延时5s后直接双极闭锁。

葛站“226事故”中,若在5051过负荷保护动作后,RPC及时发出功率回降命令,从运行方式6回降到方式2(最大直流输送功率300MW),如表1所示,方式2仅要求1组HP11/13和1组HP24/36交流滤波器,满足Abs Min Filter,那么这次事故就可以避免了。葛站整流器消耗的无功见公式(1)。

$$Q = 2 \times I_d \times U_{d0} \times \frac{1}{4} \times \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu)}{\cos 2\alpha - \cos(\alpha + \mu)} \quad (1)$$

式(1)中, I_d 为直流电流, U_{d0} 为理想空载直流电压, μ 为重叠角, α 为触发角。从式(1)可知,若属于Abs Min Filter的交流滤波器因故退出运行,又没有可用的同类型交流滤波器时,功率回降可以显著地减少换流器的无功需求,从而使Abs Min Filter在新的运行方式下得到满足。

在功率方式变化时, α 变化不大,而 μ 变化显著,双极最小功率方式120MW下运行时为 2.2° ,满功率方式1200MW下运行时为 21.4° ,假设 μ 随功率变化而线性变化,则有功无功关系见图4。

当运行方式从方式6回降到方式2,换流器无功需求也从227.64Mvar降到98.26Mvar。葛站HP11/13、HP24/36交流滤波器每组容量均为67Mvar,因此1组高通、1组低通交流滤波器(方式

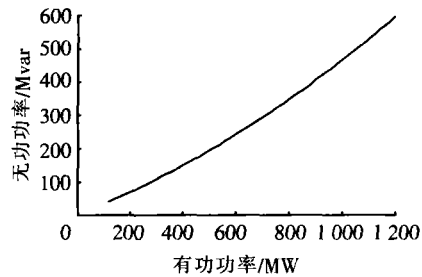


图4 有功无功关系

2)可以满足无功补偿的基本需求。2组低通交流滤波器(方式3)也可以满足其无功需要,但是不满足当时只有1组HP11/13交流滤波器的情况,因此此时功率回降只能降到方式2。由于滤除谐波的要求,没有采用2组高通交流滤波器的运行方式。

功率降低 μ 减小后对谐波幅值也有显著的影响。 μ 使电流波形的方边变圆了,从而减小了无重叠时各谐波分量的幅值,如公式(2)所示^[3]。

$$\frac{i_h}{i_{h0}} = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} \quad (2)$$

式(2)中, i_h 为谐波电流, i_{h0} 为无重叠时的谐波电流; h 为谐波次数, $H = [\sin(h+1)\mu/2]/(h+1)$, $K = [\sin(h-1)\mu/2]/(h-1)$ 。谐波分量减小倍数和谐波次数 μ 的关系见图5。

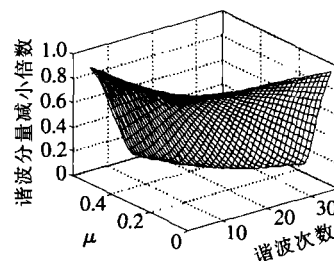


图5 谐波分量减小倍数图

对于12脉动桥,特征谐波只含有 $12n \pm 1$ 次分量, n 为自然数,他们的幅值随次数的增加而减小,第 h 次谐波其幅值为基波的 $1/h$ 。那么,不同功率运行方式下,根据公式(2)并且考虑 μ 的变化可以得出特征谐波主要谐波的幅值,见表2。可以看出,从方式6转到方式2运行时,方式2下11/13次谐波含量约相当于方式6下11/13次谐波含量的一半,因此运行在方式2时,仅仅需要1组HP11/13交流滤波器就可以满足滤除11/13次谐波的要求了。

表2 主要谐波分量数值表

谐波次数	方式6下		谐波次数	方式2下	
	大小/A	大小/A		大小/A	大小/A
11	28.75	54.62	25	10.39	5.57
13	23.89	41.66	35	5.73	3.58
23	11.74	8.76	37	5.07	3.96

2 处理方法

处理过程包括以下几个方面:(下转第441页)

表4 局部放电波形 Renyi 信息量特征参数 bit

阶数	针板	沿面	内部	楔形	悬浮
2	5.205 8	1.470 6	3.510 9	3.793 4	3.961 7
3	4.353 8	2.209 2	3.475 9	3.915 8	3.884 6
4	4.017 8	2.496 2	3.443 6	3.907 5	3.798 8
5	3.839 5	2.543 1	3.416 0	3.891 2	3.734 9
6	3.727 8	2.571 2	3.392 8	3.876 1	3.686 8
7	3.650 6	2.589 6	3.373 4	3.863 3	3.649 6
8	3.593 8	2.602 2	3.356 9	3.852 4	3.620 1

4 结语

直流下油纸绝缘中典型缺陷的局部放电脉冲波形不存在振荡分量和过冲,部分脉冲波形呈多峰状或下降沿带有毛刺。而典型脉冲波形的多种特征参数提取结果均有很大差别,有着各自的特征。这为直流下利用放电脉冲波形参数识别放电类型提供了实验依据。

参考文献:

- [1] RENATE S, JOHNL L. Partial Discharge Testing under Direct Voltage Conditions [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1982, 18(1): 82-93.
- [2] RENATE S. Ramp Technique for DC Partial Discharge Testing [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1985, 20(1): 38-46.
- [3] FROMM U. Interpretation of Partial Discharge at DC Voltages [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 761-770.
- [4] PETER H F, JOHAN J. Partial Discharges at DC Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis [J]. IEEE Trans. on

- [5] Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 328-340.
- [6] 于钦学, 邱昌容. 油纸绝缘直流局部放电的研究[J]. 变压器, 1998, 35(5): 17-20.
- [7] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 481-486.
- [8] SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. UHF Characteristic of PD in Oil-paper Insulation under DC Voltage [C]// 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008: 1081-1083.
- [9] 王国利, 郝艳捧, 李彦明, 等. 电力变压器典型局放模型放电脉冲的特性研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 5-8.
- [10] 王国利, 郝艳捧, 李彦明, 等. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-37.
- [11] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 高压直流发生器特殊结构对其内部局放测量的影响[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 129-131.
- [12] 王 猛, 高文胜, 谈克雄, 等. 局部放电脉冲波形的自回归模型参数识别法[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 1-3.
- [13] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 11-15.
- [14] SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Feature Extraction Methods for Time Frequency Energy Distribution of PD Pulse [C]// 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008: 82-84.
- [15] SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-ming, et al. Study on Time-frequency Characteristic of PD Pulse Using Wigner-ville Distribution [C]// 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, Canada, 2008: 355-357.

(上接第434页)

2.1 修改保护定值

配合好交流滤波器电抗器保护定值和 RPC 中交流滤波器投入控制时间,避免系统运行过程中交流滤波器故障跳闸后, RPC 不能及时投入备用滤波器组,导致运行的交流滤波器电抗器过负荷跳闸,最终造成 Abs Min Filter 不满足而闭锁直流系统。自动投入备用滤波器需延时 0.4 s(不计控制系统执行元件和开关合闸的固有时间),若再减小该定值,那么滤波器的快速切投则会引起电压很大的变化;因而增大了电抗器过流保护的时间定值。将 L_2 过负荷 I 段保护时间定值由 0.2 s 改为 1.2 s, 以与控制系统相配合。

2.2 修改 RPC 策略

增加了一个 RPC 启动紧急功率回降的判据,如下:当出现 3 组 HP11/13 都不可用或 1 组低通两组高通的组合时,若 Abs Min Filter 条件不满足,则经 3 s 延时后,按照 Abs Min Filter 要求和现场交流滤波器状况,启动紧急功率回降。同时,要求运行人员在手动投切交流滤波器前,必须考虑投切后 Abs Min Filter、交流母线电压限制(U_{\min}/U_{nom})、无功限制(Q_{\min})是否满足要求,如不满足要求,可申请调度预先对直流功率进行适当的调整,以免造成交流滤波

器 Abs Min Filter 不满足的运行工况。

2.3 修改运行操作规程

虽然 RPC 手动运行方式仍可根据系统无功需求自动投切交流滤波器,但由于此次滤波器投切时间和保护动作时间不匹配,导致闭锁双极,因此规定在手动操作切除交流滤波器时,先投入备用滤波器,然后才能切除待切滤波器。

2.4 修改监控系统界面

在手动选择切除某一组滤波器时,若切除后会造造成 Abs Min Filter 不满足,并且通过软件计算发现会导致滤波器设备过负荷保护跳闸时,控制系统发出“绝对最小滤波器将不满足,禁止切除!”的告警事件,以对运行人员的操作进行提示。

参考文献:

- [1] 许世刚. 葛洲坝换流站控制保护系统国产化改造 [J]. 华中电力, 2006, 19(5): 50-52.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-hill, 1994.