

±800 kV 特高压直流与 ±500 kV 常规直流 控制保护系统比较分析

陈小军¹, 何露芽¹, 孙杨¹, 李晶²

(1. 国家电网公司运行分公司上海管理处, 上海 201413; 2. 国家电网公司运行分公司生产技术部, 北京 100005)

摘要:与常规直流单极仅有1个单12脉动换流器不同,特高压直流单极由2个12脉动换流器串联,阐述了特高压直流极运行时单个换流器的投退方案及其投退时触发角控制;稳态运行时整流站和逆变站2个串联换流器的触发角控制;同时比较了保护三取二模式与常规直流保护逻辑。

关键词:特高压直流;换流器投退;三取二;触发角控制

作者简介:陈小军(1978-),男,工程师,从事跨区电网特高压直流与常规直流输电换流站生产运行管理工作。

中图分类号:TM721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-9529(2012)03-0462-05

Comparative Analysis on Control and Protection System of ±800 kV UHVDC and ±500 kV HVDC

CHEN Xiao-jun¹, HE Lu-ya¹, SUN Yang¹, LI Jing²

(1. Shanghai Management Branch, National Grid Company of China, Shanghai 201413, China;

2. Production and Technology Branch, National Grid Company of China, Beijing 100005, China)

Abstract: Unlike the traditional DC project, the pole of UHVDC consisted of two 12-pulse converters connected in series. This paper describes the way of a by-passed converter start/exit when the pole is in full operation and the firing angle control of that time, the firing angle control of rectifier and inverter in steady-state operation; it also compares the by-pass breaker protection and the 2 out of 3 protection model with its advantages.

Key words: UHVDC; converter start/exit; 2 out of 3 protection; firing angle control

2010年7月,国内向家坝—上海(XS800)特高压直流输电示范工程投入试运行,标志着我国在直流输电设计、运维等领域已步入世界一流水平。工程两端由复龙、奉贤换流站、直流输电线路及接地极构成,设计额定运行电压为±800 kV、电流为4 000 A、双极功率为6 400 MW。由于电压等级高、输电容量大,所以对设备的各种耐受力要求比常规直流更高,在一次设备设计和运行方式上与常规直流有较大区别。正是由于一次设备、运行方式的巨大变化导致控制保护设计也有较大改变,如增加控保结构层次、添加了运行中单个换流器的投入程序、增加了不平衡运行保护程序等(软件仍基于HIDRAW),同时还对常规直流运行中的不足进行了改进,如改变通信方式、升级硬件、改进阀冷却漏水保护等。

1 运行中单组换流器的投入和退出控制

±500 kV 常规直流单极仅有一个12脉动换流器,如宜华直流工程华新换流站,其运行方式简

单,换流器及其相关设备出现紧急故障,整个极必须退出运行。直流控制保护(包含触发角控制)都集中在PCP(极控制保护)主机中,所以常规直流不存在极运行中投入\退出单个换流器的问题,也就不存在同极2个换流器触发角配合问题。

区别于常规直流,极运行中投入\退出单个换流器是由于特高压直流单极采用串联双12脉动换流器使得运行方式多样化而产生的新问题,其投入单个换流器的触发角控制在换流器控制保护(CCP)SCA中,当换流器运行正常后触发角控制转为PCP(极控制保护)控制。单个换流器的投入\退出的设计结构中采用旁通断路器BPS过渡流过换流器的电流。本段详细讲述了单个换流器的投退方案及软件。

±800 kV 特高压直流输电的单极采用2个12脉动换流器串联的接线方式,如图1所示,其可以2个换流器串联运行,也可单个换流器独立运行,并在极运行状态下投入或退出某个换流器而不影响同极另一个换流器的正常运行,于是

求同极 2 个串联换流器触发方式合适。

特高压直流的控制保护分为换流器层 (CCP)、极层 (PCP)、双极层 (BCP)。投入\退出单个换流器的触发角控制在换流器控制保护 CCP 中。

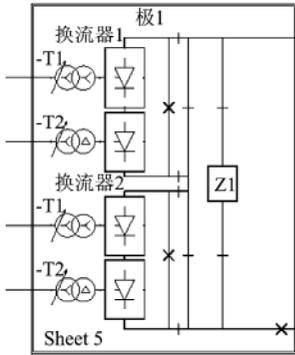


图1 单极换流器串联接线方式

1.1 单极由单 12 脉动转入双 12 脉动换流器运行

方式转换前运行方式见图 2, 单极仅 CV₂ 运行, 图中黑色(粗)线为电流路径。换流器 CV₁、CV₂ 分别并联一个断路器即旁通开关 BPS 和旁通隔离开关 BPI。

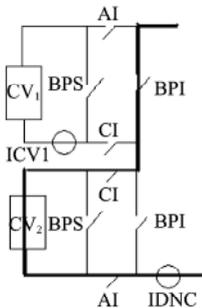


图2 单极换流器接线

此时, CV₂ 不停运, 投入 CV₁ 的步骤为: 1) 合隔离开关 AI、CI; 2) 闭合旁通断路器 BPS, 与 BPI 并联分流; 3) 断开旁通隔离开关 BPI; 4) 解锁换流器 CV₁。此时 CV₁ 和 BPS 并联; 5) 当电流完全由 BPS 转到 CV₁ 上时, 断开旁通 BPS。

BPS 为普通的交流断路器, 断路器的重要任务是熄灭电弧。当断路器开断时有电流流过, 在开关触头分离的瞬间, 触头间会出现电弧^[2]。所以要求断路器断开时流过其的电流接近为 0, 这样可以熄灭电弧; 同时还要求弧隙电压较小, 不会引起电弧重燃。所以上述第 5 步拉开 BPS 时有如下要求:

(1) 断路器两端电压为 0, 即换流器 CV₁ 两端电压为 0; (2) 流过断路器的电流为 0, 此时 CV₁ 和 BPS 并联 $I_{BPS} = 0$, 所以线路电流完全经过换流器 CV₁。此时 CV₁ 对应的触发角计算如下(整流侧、逆变侧都适用): 设直流线路电流为 I_d , 同时满足上述打开 BPS 的要求。则:

$$U_d = U_{dio} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_c I_d = 0^{[3]}$$

式中 U_{dio} ——开路电压;
 α ——触发角;
 X_c ——换流器阻抗。

当触发角 α 调节到上面计算值时, 可以断开旁通开关 BPS。

对这个过程的定性解释: 解锁 CV₁ 后, CV₁ 和 BPS 并联时, 由于 BPS 上电压几乎为 0 (假设断路器电阻为 0), 所以换流器 CV₁ 两端电压被 BPS 钳制为 0, 随着触发角的减小, 流过换流器的电流逐渐增大, CV₁ 相当于 1 个由触发角控制的可变电流源, 由于直流电流恒定, 所以流过 BPS 的电流逐渐减小, 当 CV₁ 电流增大到 I_d 时, 流过 BPS 的电流 0, 也就可以断开 BPS 了。

投入单个换流器的触发角计算程序封装在 CCP 中的 SCA (Start Control Amplifier) 中, 见图 3。SCA 按上述算法计算了当 $ID_PU = IDNC_PU$ (即线路电流等于流过 CV₁ 的电流) 时的触发角。SCA 屏蔽了由电流控制器 CCA 送来的触发角 ALPHA_ORD_POLE, ALPHA_ORD 输出的是 SCA 计算出的触发角。

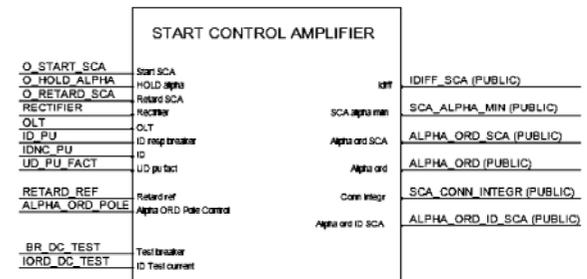


图3 SCA

SCA 中有 1 个控制器, 当流过 BPS 的电流为 0 时, 收到 O_HOLD_ALPHA 信号保持触发角, 有一段延时等待 BPS 打开^[4]。BPS 分开后, 其会转移到 CCA (电流控制器) 输出的触发角命令, 触发角逐渐变化至 CCA 的触发角命令值, 进入稳态运行时的触发角控制。

1.2 单极由双 12 脉动转入单 12 脉动换流器运行

手动退出单个换流器时先退逆变侧,后退整流侧,这与退出整个极的顺序相反;原因是若先退整流侧,则整流侧电压比逆变侧电压低,无法传送电能。保护动作引起的单个换流器退出不受这个顺序控制,当保护退出逆变侧或整流侧的单个换流器时,不平衡运行保护会动作,它通过测量直流电压确定运行换流器的个数,使两站运行的换流器的个数平衡。退出单个换流器采用 Y 闭锁。其步骤为:1) 进行功率调整,使功率在退出该换流器后的功率等级范围内;2) 给待退出的换流器触发角命令;3) 投旁通对;4) 闭合旁通开关 BPS;5) 闭锁;闭合旁通刀闸;拉开 BPS,打开隔离开关 AI、CI。

拉开旁通断路器 BPS 时,由于此时断路器两端电压为 0,当开关拉开小间隙时,断路器电阻会立即远大于隔离刀闸的电阻,其上的电流会立刻转移到刀闸上,于是旁通开关此时可以顺利断弧。

2 常规直流与特高压直流稳态运行时触发控制比较分析

常规直流的触发角控制在极控制保护(PCP)中。一般情况下,稳态运行时,整流侧确定直流运行电流,逆变侧确定直流运行电压。整流侧和逆变侧都有熄弧角控制器(AMAX)、电压控制器(VCA)、电流控制器(CCA)。图 4 为 3 个控制器之间的联系,3 个控制器之间相互制约。

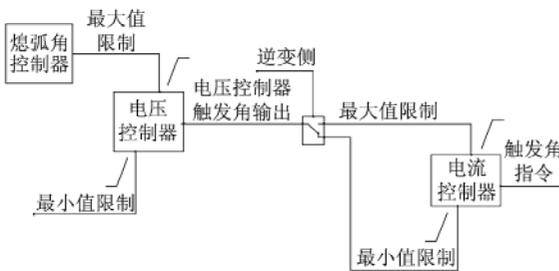


图 4 三个控制器间的制约关系

特高压直流的触发角控制与常规直流相似,但由于特高压直流单极有 2 个换流器,所以 2 个换流器的触发角命令就要相互配合,否则会运行不稳定。常规直流由 PCP 计算出触发角且在其 PCI_A 板卡转化为触发控制脉冲;特高压直流单极有 2 个换流器,稳态运行时 2 个换流器的触发角控制在 PCP 中,之后送至 CCP 中产生触发控制

脉冲。同极的 2 个换流单元间无通信,可稳定运行。因为整流侧由 CCA 计算后送至 2 个换流器的触发角一致,不需要任何措施可保证串联 12 脉动阀组的电压平衡;逆变侧采用定熄弧角控制,触发角计算与测量单元无直接联系,所以不存在整流侧的偏移问题。下文分别介绍特高压直流整流侧和逆变侧的触发控制。

2.1 整流侧

整流侧运行时,一般仅用到电流控制器 CCA,其为一个 PI 控制器,利用直流电流和电流整定值之间的差值通过合适地闭环控制计算出触发角 α 。稳态运行时电流整定值由功率除以电压计算得到。熄弧角控制器和电压控制器计算得到的触发角值作为电流控制器的限值,电压控制器 VCA 也是 1 个 PI 闭环控制器,设计中将电压控制器的电压参考值取得很大,复龙站为 857 kV^[8],远大于运行电压 800 kV,VCA 为了提高电压(努力使运行电压到达参考值 857 kV)计算输出的触发角很小,其作为电流控制器 CCA 的下限,由于值太小无法限制 CCA 计算出的触发角,所以整流侧起作用的控制器仅有电流控制器 CCA。

电流整定值 I_0 经 VDCOL(低压电流限制器)后至 CCA 的 PI 控制器计算出触发角 α ,PCP 主机通过总线将触发角 α 分别送至 2 个 CCP(换流器控制保护)主机中,见图 5。

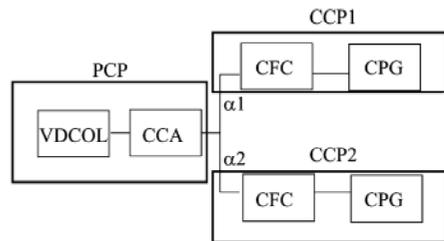


图 5 触发角传送途径

2.2 采用此触发方式的原因

由于如前所述的触发控制方式,使得稳态运行时整流侧同一个极的 2 个换流器的触发角相同,能够均匀地分配直流电压。

若 2 个换流器使用了不同的触发控制系统,如触发角控制位于换流器层 CCP 中,则会出现运行稳定问题。如由于测量误差引起的整流侧触发角偏移问题,分析如下:

复龙站对极地电压

$$U_{dl} = N_1 (1.35 U_1 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d) \quad [3]$$

奉贤站对地直流两电压

$$U_{d2} = N_2(1.35U_2 \cos\gamma - \frac{3}{\pi}X_{r2}I_d) \quad [3]$$

式中 $N_1、N_2$ ——站中 6 脉动换流器的数目;
 $U_1、U_2$ ——整流站和逆变站换流变压器阀侧空载
 线电压有效值;
 α ——触发角;
 γ ——关断角;
 I_d ——直流电流。

基于此,可做图 6,交点 A 即为稳定工作点。同极 2 个换流器的电流相等,而由于测量误差 2 个换流器 CT 测量得到的电流值 $I_0'、I_0''$ 和整定值有偏差,见图 6。此时,系统会认为 CV_1 工作在 B 点, CV_2 工作在 C 点。于是,整流侧 CV_1 会减小触发角 α_1 , CV_2 会增大触发角 α_2 ,造成 2 个换流器电压不等, U_{CV_1} 增大, U_{CV_2} 减小。此时线路电流

$$I_d = \frac{(U_{CV_1} + U_{CV_2} - U_{INV})}{R_{Line}}$$

式中 U_{INV} ——逆变侧电压;
 R_{Line} ——线路电阻。

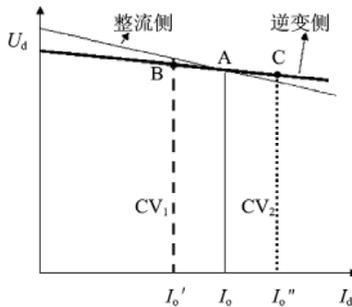


图 6 稳态运行外特性曲线

假设经过调节后,线路电流仍为 $I_d = I_0$,测量误差始终存在,此时,触发角仍会进行上述调整。 CV_1 的触发角会越来越小, CV_2 的触发角会越来越大;两者的电压差会越来越大。

采用图 5 所示的控制方式就消除了由于测量误差引起的触发角偏移问题。2 个换流器具有相同的触发角,不会受测量误差影响。

2.3 逆变侧

逆变侧电流整定值比整流侧小 ΔI (≈ 0.1 p.u),复龙站 $I_0 = 4000$ A,则奉贤站 $I_0 = 3600$ A。根据电流控制器 CCA 的逻辑,奉贤站为了使直流线路电流工作在 3600 A,会减小 γ ,即增大触发角,借用图 6,设 I_0' 为逆变侧电流整定值 3600 A, I_0 是线路电流 4000 A。逆变侧为使工作电流在 I_0' 就要减小 γ 使两个站外特性曲线交点横坐

标为 I_0' ,要减小 400 A 电流,触发角要增大很多,使得由 CCA 计算的触发角超过了最大限制,于是逆变站 CCA 计算的触发角失效,触发角由电压控制器的输出 VCA_ALPHA 确定。

奉贤站使用的是定熄弧角控制^[3]

$$\beta = \arccos(\cos\gamma - \frac{2X_{r2}I_d}{\sqrt{2}U_2})$$

为了使工作稳定,将定 γ 控制改为定 β 控制,即使逆变侧外特性曲线斜率为正。于是可改为

$$\beta = \arccos(\cos\gamma - \frac{2X_{r2}I_d}{\sqrt{2}U_2} - K(I_0 - I_d)) \quad [5]$$

$$\alpha = 180^\circ - \beta$$

定熄弧角控制的程序封装在 AMAX 模块中, $CV_1、CV_2$ 关断角 γ 其受无功功率、双极功率因素的调整会在 17° 左右波动。定熄弧角输出的 AMAX 作为电压控制器的输出上限,电压控制器的输出超过了上限,输出定熄弧角控制器的结果。CCA 计算出的触发角先经电压控制的限制后再经 AMAX 的输出 ALPHA_MAX 限制。逆变侧的输出定熄弧角 AMAX 计算出的触发角 ALPHA_MAX。

3 保护出口策略比较分析

除了与常规直流在控制方面的不同,特高压直流在保护出口上也与常规直流有很大不同。

常规直流保护装置一般有 2 套,保护出口有 2 种方式:1) 通过系统切换防止误出口(如龙政直流工程平换流站):1 套保护动作,首先切换系统,若第 2 套保护也动作则保护出口,避免因单元件故障而引起误出口;2) 通过测量元件故障闭锁保护的方式防止误出口(如宜华直流工程华新换流站)。

向上特高压直流工程的交流滤波器保护与宜华常规直流工程保护相似,有 2 套保护系统,通过检测元件故障闭锁保护,任一保护动作即出口。但自检功能更加完善:如检验码由以前的 1 位增加到 7 位等。

特高压直流 DCC800 控制保护采用的是 3 取 2 模式,本文通过介绍换流器投退中的旁通断路器保护及其 3 取 2 保护出口逻辑来说明特高压直流是如何通过改进出口逻辑来降低保护误动作风险的。

3.1 旁通断路器保护

换流器的投入过程中,换流器解锁以后,电流转移至换流器,BPS要拉开,若此时BPS拉不开,旁通断路器保护启动,与一般交流断路器的失灵保护相似。如图2所示 $I_{BPS} = |IDNC - I_{CV1}|$,若开关的辅助接点显示开关已拉开,即开关在“分”位,而 $I_{BPS} > I_{set}$ 则可以认为流过旁通开关的电流过大,说明开关未断弧,此时应快速重合闸^[7]。保护动作结果:重合BPS,阀组Z block。

3.2 保护出口

上面所述的保护动作结果将送至控制主机MC1,重合闸命令送至接口屏CSI的PS932板卡。

见图7,3套保护动作结果送至MC₁判断是否出口,选择器通过MC₂的系统状态选择出口动作。3个MC₂系统都在ACTIVE状态且系统无故障,即 $A_1A_0 = 01$,保护为3取2出口,bitwise&将A、B、C3套系统的保护信号两两取“与”,之后任意1位保护信号为1就出口。 $A_1A_0 = 10$ 时,即MC₂单系统或2个系统运行且系统无故障时,3套系统取或,即任1套保护动作都会出口(CSI中程序在PS932中,与此相似)。

系统在出口前检查系统故障,保证系统无故障,减小系统由于保护元件故障引起的误动作。

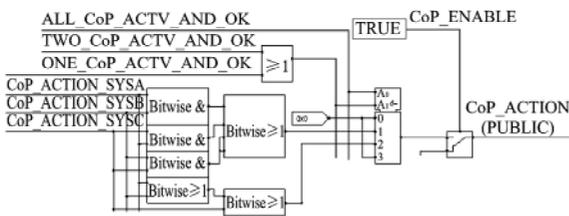


图7 3取2逻辑

3.3 小结

500 kV 常规直流中,如华新换流站采用2取1出口,首先会检查系统故障防止误出口,但仍存在系统自身元件故障且自检未检出引起保护误出口的潜在危险。特高压直流中不仅有比常规直流更准确的系统自检功能,同时3取2将发生上述误出口的概率降低。特高压直流退出一套保护后与常规直流(如华新站)保护出口策略相似。

龙政直流政平站保护出口要先切换系统,若第2套也发生动作,则保护出口,等同于2套保护

都动作才会出口。对于一些重要设备保护,如换流变保护仍采用2取1方式,所以特高压直流保护仍优于常规直流工程(如政平站)保护策略。

4 结语

±500 kV 常规直流单极仅有1个12脉动换流器,其控制保护主要集中在PCP(极控制保护)主机中;特高压直流单极由2个12脉动换流器串联组成,其控制保护分层,分为CCP(换流器控制保护)、PCP(极控制保护)、BCP(双极控制保护)。本文介绍特高压直流特有的极运行时投入\退出单个换流器的触发角由CCP中SCA控制,不影响同极另一个换流器的运行。稳定运行时,特高压直流触发角控制方式和常规直流相似,整流侧由PCP中的CCA控制触发角,逆变侧为定熄弧角控制,此时同极2个串联换流器的触发角相同。特高压直流保护出口采用3取2结构,比常规直流更为可靠。

参考文献:

- [1] ABB philosophy for leakage detection in the cooling system. 向上±800 kV 特高压直流工程 ABB 功能报告[R]. 2009.
- [2] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] Hans Hillborg, Switching Sequence and Interlockings. 向上±800 kV 特高压直流工程 ABB 功能报告 1JNL100119-390 Rev.01 [R]. 2007.
- [5] FLISBERG G, DC power and current control modes and features. 向上±800 kV 特高压直流工程 ABB 功能报告 1JNL100118-968 [R]. 2007.
- [6] SKYTT A K, AC-filter protection for XS800 project. 向上±800 kV 特高压直流工程 ABB 功能报告 1JNL100121-487 [R]. 2007.
- [7] FLISBERG G, HVDC Protection System. 向上±800 kV 特高压直流工程 ABB 功能报告 1JNL100120-006 [R]. 2007.

收稿日期: 2011-09-26

本文编辑: 邵振华