

# 云广特高压工程控制系统功能分布研究

周君文, 刘涛, 李少华

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 特高压直流输电系统采用串联双12脉动换流器接线方式, 结构及控制复杂。对其控制系统功能分层结构进行分析研究具有重大意义。详细分析了特高压直流输电系统的功能分层结构, 包括双极层、极层和阀组层的控制功能以及它们之间的相互协调和配合。

**关键词:** 特高压直流输电; 双极层控制; 极层控制; 阀组层控制; 换流器

## Research on control functions in UHVDC system

ZHOU Jun-wen, LIU Tao, LI Shao-hua

(XJ Electric Co. Ltd, Xuchang 61000, China)

**Abstract:** UHVDC system is bipolar with two 12-pulse converters in series, it has much more intricate structural and functional arrangement. The basic control strategy and control functions for the double converters in series are discussed. In this paper, the bipole level control, pole level control, group level control as well as the coordination between them are analyzed in detail.

**Key words:** UHVDC; bipole level control; pole level control; group level control; converter

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0070-06

## 0 引言

云南—广东±800 kV 直流输电工程是南方电网“十一五”西电东送的主要输电通道, 工程双极额定功率为5 000 MW, 投运后对南方电网的安全稳定运行起着举足轻重的作用。相比常规直流系统, 云广特高压工程主要特点在于其采用了双12脉串联阀组结构, 具有更高的电压等级, 更大的输送容量和更远的传输距离, 对直流控制保护设备在可靠性和功能完善性上提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。特高压直流输电系统具有更多、更复杂的运行方式, 因此在控制功能的分布上较常规直流具有很大的不同。

云广±800 kV 换流站直流控制保护系统采用完全冗余、分层分布式结构配置, 与±500 kV 常规直流输电控制保护的总体结构设计基本相同, 都采用三层结构, 即运行人员控制层、控制保护层和现场处理层。但为了提高串联双阀组直流系统的可靠性和可用率, 云广工程将直流控制系统又分为双极控制层、极控制层和阀组控制层。双极层和极层之间的交换信号主要是极功率指令, 极层和阀组层间的交换信号主要为电流指令和控制信号, 而阀组层之间则相互独立。下面就云广特高压直流输电工程

中控制功能分层分布进行详细的分析和探讨。

## 1 双极控制层功能

特高压工程中双极层功能放在直流站控中实现, 双极层接收运行人员的指令, 产生双极功率参考值, 并通过控制总线下发给极控制层。双极层控制的主要功能有: 双极功率控制、稳定控制、功率方向控制、电流平衡控制、轻载无功优化等<sup>[2]</sup>。

### 1.1 双极功率控制

双极功率控制是指极控系统根据运行人员设置的双极功率参考值来调节控制系统, 使之保持双极功率恒定。它可分为自动功率控制和手动功率控制。自动功率控制模式是指双极功率定值及功率变化率按预先安排好的负荷曲线自动变化, 而手动功率控制模式则是指在主控站由运行人员手动设置双极功率定值和功率变化速率。

功率参考值的来源主要有两个方面: 运行人员设定的功率定值和稳定控制产生的功率调制量。功率控制的基本原理是用希望得到的双极功率参考值除以整流侧测量的双极直流电压得到对应的电流指令, 然后将此指令送往阀组控制以产生相应的触发角信号。

如果一个极降压运行, 功率控制功能将增加双极的电流参考值以维持双极功率恒定并尽量平衡双极运行; 如果一个极闭锁, 双极直流电压将下降为运行极的直流电压, 为了维持直流功率, 由 P/U 单元计算得到的电流参考值将变为双极运行时的两倍, 此时如果运行极的过负荷能力允许, 则运行极的直流电流将增加为双极运行时的两倍。当被闭锁的极恢复运行时, 极控系统 will 自动地将功率平衡分配到两极, 再次回到双极运行状态。

## 1.2 稳定控制

稳定控制是直流系统的附加控制功能。当交流系统受到干扰时, 稳定控制功能通过调节直流系统的传输功率使之尽快恢复稳定运行。云广工程的稳定控制功能包括功率提升、功率回降、频率限制、双频调制和阻尼同步振荡等。

由于逆变侧的功率控制器不起作用, 极控系统通过站间通讯将逆变侧生成的稳定调制量送到整流侧, 并与整流侧产生的调制量相加形成最终的稳定控制参考值  $P_{refAC}$ 。功率斜率发生器的输出值  $P_{refDC}$  和稳定控制参考值  $P_{refAC}$  相加作为最终的功率参考值输出控制直流系统的功率传输。当站间通讯失败时, 逆变侧的稳定控制功能闭锁。

当换流站的双极都选择了电流控制模式时, 电流斜率发生器的输出值直接和稳定控制的调制电流参考值相加作为最终的电流参考值; 当一极为功率控制模式, 另一极为电流控制模式时, 稳定控制产生的电流参考值会由电流控制模式的极送到功率控制模式的极执行, 这通过极间功率转移 (Pole-Pole Power Transfer) 完成。

## 1.3 功率方向控制

高压直流输电系统都具备正向和反向直流功率输送能力, 有时候还需在运行过程中进行功率反送, 所以极控系统中提供了功率反转功能。功率反转分为在线反转和离线功率反转。在线功率反转指在直流系统运行时, 先降低直流功率到最小值, 再降低直流电压到零, 然后反方向提升直流电压和直流功率, 在线改变功率方向期间, 并不闭锁触发脉冲。

云广工程中只配置了离线功率反转功能, 它只能在闭锁状态下执行, 因此对交流系统和直流系统没有冲击。只要没有解锁或空载升压, 运行人员就可下发功率反转的命令, 当运行人员选择新的功率方向后, 原来的整流站变为逆变站运行, 原逆变站则切换为整流站运行。

## 1.4 电流平衡控制

电流平衡控制功能 (Current Balance Control)

用来平衡双极实际的直流电流, 它是一个闭环积分控制器, 最大输出为额定电流值的 2%。CBC 只有在两极都运行于双极功率控制模式、双极均解锁且没有空载升压的情况下在整流站有效。当极间功率转移激活时, CBC 自动禁止。

电流平衡控制的输出乘上不同的符号位后分别与两极极控系统内的电流参考值  $I_{ref}$  相加, 从而使得两极的电流尽可能相等, 使接地极电流趋近于零。此外, 一些接地极保护功能会请求双极电流平衡, 这时控制系统会启动另一个平衡控制器快速调节两极的电流参考值, 直至达到允许电流的上下限, 而不管当前的运行方式如何, 如图 1 所示。

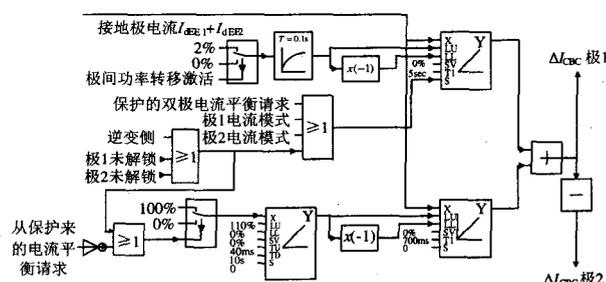


图 1 电流平衡控制逻辑图

Fig.1 Logical diagram of current balanced control

## 1.5 轻载无功优化

轻载无功优化功能是指在低负荷时增大换流阀的触发角, 以增加换流器吸收的无功功率, 减少直流系统注入到交流系统的无功, 从而减轻交流系统轻载时的调压难度。这种模式下, 换流变分接头调节到最高档以减小阀侧电压, 进而降低直流电压值。

## 2 极控制层功能

极控制层功能完成与极相关的控制功能, 从双极控制层接收极电流/功率参考值, 进一步产生换流器层闭环控制所需要的直流电流、直流电压、熄弧角参考值。其主要功能有: 极解锁/闭锁顺序、直流线路故障重启顺序、极电流限制、极电流协调、低压限流环节等。

### 2.1 极解锁/闭锁顺序

特高压直流输电系统每极由 2 个 12 脉动换流器串联而成, 所以极解锁/闭锁逻辑比常规直流输电系统多了两种特殊的方式: 解锁第二个阀组和闭锁第一个阀组。这两种情况都需要高速旁路开关和阀触发脉冲信号做密切配合, 并且整流站和逆变站动作时刻也有严格要求。

串联双阀组同时解闭锁的情形与常规直流系统

完全一致。但当串联双阀组不同时解解锁时，基于安全性和对交直流系统的冲击考虑，程序逻辑中需要确保第二个阀组解锁时整流侧先于逆变侧一个很短的时间；闭锁第一个阀组时，逆变侧先于整流侧一个很短时间。并且当站间通信故障时，不建议解锁第二个阀组。

### 2.2 直流线路故障重启顺序

由于直流架空线路的短路故障大多数是瞬时性的，所以设置了直流线路故障重启顺序(DC Line Fault Recovery Sequence)。当直流保护检测到线路故障以后，将信号传到极控，极控系统立即强制移相并且经过一定的放电时间后直流系统试图重启，以尽快地恢复直流系统的运行。

每一极的重启次数以及放电时间可以由运行人员设定。正常情况下如果本站的直流保护已经检测到直流线路故障时，则本站的极控系统不使用对站送过来的直流线路故障信号，只有本站没有检测到故障时才会使用对站的直流线路故障信号启动本站的直流线路故障恢复逻辑。这可防止两站重启次数计数器的计数值不一致。

在整流侧，当检测到直流线路故障后，设置输入到VDCL的直流电压为零，启动交直流系统故障恢复的暂态电流控制，极控系统将触发角移相到 $120^\circ$ ，当直流电流降低到零时将角度设定到限制值。这个过程虽然类似于移相闭锁，但控制系统触发脉冲一直使能，所以极解锁信号一直存在。经过一定的放电时间后，直流系统自动重启。如果重启以后直流线路故障消失，则系统继续运行；如果重启后直流线路故障依然存在，控制系统再次重复先前的移相动作，同时计算重启次数，当重启次数达到运行人员设定值时，控制系统将启动闭锁顺序；在逆变侧，当检测到直流线路故障后设置熄弧角实际值为零使触发角向 $120^\circ$ 的方向移动使直流电压降低，当电流重新建立后，再释放触发角限制重新控制电压。

如果通讯故障，在整流侧检测到直流线路故障，整流侧将直流电流降为最小并经过放电时间后重启，如果重启次数达到了，则整流侧按闭锁顺序闭锁，逆变侧由直流低电压保护动作闭锁；而在逆变侧检测到直流线路故障时则不会启动直流线路故障重启，最后整流侧和逆变侧均由直流低电压保护闭锁。

### 2.3 极电流限制

极层需要考虑各种电流限制条件，并根据允许的最大电流值计算极的功率传输能力。极电流限制(Pole Current Limitation Function)主要是根据主设

备的过负荷能力计算最大允许电流值，并与对站最大电流进行协调计算。PCL就是从系统主设备的过负荷能力、可用交流滤波器数计算的电流限制、功率极限计算的电流限制、直流保护请求的电流限制、FASOF(Fast Switch-Off Sequence)电流限制、降压运行的电流限制、功率反转的电流限制、站间通讯失败后的电流限制、解锁/闭锁过程中的电流限制、运行人员设定的电流限制、对站的电流限制中选取一个最小的电流参考值。

### 2.4 极电流指令协调

极电流指令协调(Pole Current Order Coordination)示录根据各种不同情况选择用于换流器控制的电流命令，如图2所示。PCOC保持逆变站电流控制器的电流裕度，以防止逆变站投入电流控制。电流控制参考值在两站之间通过站间通信进行交换。就地主导站(整流站)的电流命令由电流命令计算器决定。用于电流控制的电流命令将用本站计算的电流命令和另一站的回检电流指令中的较大值，而远程主导站(逆变站)用于电流控制的电流命令则是取两者中的较小值。这就保证了逆变站的电流命令不大于整流站的电流命令。

如果就地主导站的电流命令增加，则该增加的量将直接进入电流控制器，而不需要等待远程主导站的电流命令回检信号。当就地主导站的电流命令减少时，则只有收到远程主导站的电流命令回检信号后，才能开始降低直流电流，这样可以避免在逆变站瞬时裕度损失。

当站间通讯故障时，逆变站的电流指令等于跟踪的直流电流值。

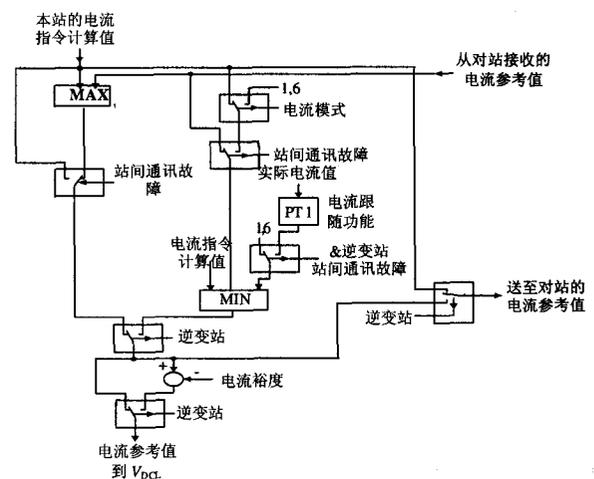


图2 极电流指令协调逻辑图

Fig.2 Logical diagram of pole current order coordination

## 2.5 低压限流功能

低压限流(Voltage Dependent Current Limitation)功能是在直流电压降低时对直流电流指令进行限制,它的主要作用是当交流网扰动后,可以提高交流系统电压稳定性,帮助直流系统在交直流故障后快速可控地恢复,并可避免连续换相失败引起的阀过应力。

如果由于某种原因直流电压降至  $U_{DHIGH}$  以下,如图 3 所示,电流指令的最大限幅值开始下降。如果当前电流指令大于电流指令的最大限幅,则输出的电流指令将降低。电流指令的降低可防止逆变端发生交流故障时造成的电压不稳。如果直流电压持续下降至低于  $U_{DLOW}$ , 电流指令的最高限幅则不再下降,并保持在当前值。

在整流站和逆变站,  $V_{DCL}$  功能有不同的特性。其作用是在直流线路故障和交流系统故障后恢复时,保持逆变器的有效的电流参考值  $I_{ref}$  低于整流器的  $I_{ref}$ , 这样可以加速故障的恢复,防止逆变器电流控制长时间投入运行。此外整流侧和逆变侧输入量的滤波时间常数也不同,整流侧的时间常数比逆变侧的时间常数短。这样可以在故障恢复时使整流侧更快地恢复电流控制。

当交流低电压,直流线路故障,空载升压,换流器闭锁以及紧急停机等情况下,  $V_{DCL}$  的输入被设为零,以加速  $V_{DCL}$  的投入运行。

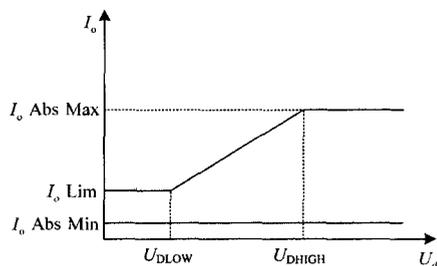


图 3 低压限流功能

Fig.3 Function of voltage dependent current limitation

## 2.6 极间功率转移

在双极功率控制模式下,由于每个极的电流指令都是由双极功率参考值除以双极直流电压得到的,所以正常情况下两个极的电流指令相等。但是在以下两种情况下 PPT 功能将尽可能地维持稳定的功率传输。

1) 当一个极运行于双极功率控制模式而另一极运行于电流控制模式时,由于运行于电流控制模式的极的电流参考值和运行于功率控制模式的极计算得到的电流参考值不一定相等,所以整个直流输

电系统的传输功率就不一定等于操作员设定的功率参考值。这种情况下,极间功率转移功能会把两极的电流参考值的差乘以电流控制模式极的直流电压转换为功率后送到处于功率控制模式的极,功率控制模式的极接收到另一极送过来的功率值后除以本极直流电压转换成电流指令后加到本极根据功率参考值计算的电流指令上。

2) 当一个极的电流处于限制状态并且另一极为双极功率控制模式时,为了维持传输功率不变,极间功率转移功能将电流参考值与受限电流的差值转换成功率后送到另一极,处于功率控制模式的极将其转换成电流指令后加到本极的电流指令上以补偿损失的传输功率。

为了适应两极直流电压不相等的情况(例如一极运行于正常电压,另一极降压运行),PPT 以功率形式传递。PPT 功能只在整流侧有效,由于 PPT 势必引起两极的直流电流不等,接地极电流增加,所以当 PPT 起作用时会退出电流平衡控制。

## 3 阀组层功能

阀组层功能完成对 12 脉冲换流阀组的高速闭环控制,主要包括直流电流控制、直流电压控制、熄弧角控制、换流变分接头控制等。

### 3.1 直流电流控制

直流电流控制是高压直流输电的基本控制方式,正常运行时,整流侧电流控制起作用,逆变侧电压控制或定熄弧角控制起作用。

在整流侧,  $\Delta I_d$  和  $\Delta U_d$  经过最小值选择器选择之后,输入到 PI 控制器产生需要的触发角度。如果直流电流增加,  $\Delta I_d$  变为负值,PI 调节器会增大输出的触发角直到直流电流恢复到参考值设定的运行水平;反之 PI 调节器将减小触发角直到直流电流恢复到参考值设定的运行水平。

在逆变侧,电流、电压以及熄弧角三个控制器的控制误差  $\Delta I_d$ ,  $\Delta U_d$  和  $\Delta \gamma$  经过最大值选择器选择之后输出到控制器,产生需要的触发角度。正常情况下,由于逆变侧具有 0.1 pu 的电流裕度,所以电流控制不会被选择。如果由于某种原因直流电流下降到小于直流电流参考值减去电流裕度的差,则  $\Delta I_d$  变为正值,如果此变化量大于另外两个控制器的误差值,则直流电流控制被选择,控制器会通过减小触发角来增加直流电流。并且电流裕度补偿功能激活,使得逆变侧电流参考值接近整流侧的电流参考值。

### 3.2 直流电压控制

直流电压控制在两站有不同的用途。在逆变侧

直流电压控制器是正常的控制方式以维持系统的直流电压，在整流侧，正常情况下直流电压控制作为一个限制器，当直流电压大于电压参考值与电压裕度之和时，整流侧的电压控制器会瞬时的投入，防止直流过压。

如果整流侧交流电压降低，整流侧由于最小  $\alpha$  角限制而失去电流控制，逆变侧将接管直流电流控制，此时的直流电压将决定于最小  $\alpha$  角和整流侧的交流电压值；如果整流侧交流电压增加到正常值以上，整流侧直流电压控制可能会瞬时投入运行以控制直流电压，但是一般情况下，虽然整流侧交流电压增加到正常值以上了，整流侧还会维持为电流控制，因为交流电压增加也引起直流电流的增加，电流控制器会通过增大  $\alpha$  角使直流电流恢复正常，这也就使整流侧的直流电压降低到正常水平。究竟哪种控制器起作用主要看直流电压和直流电流的变化幅值和变化速率。

在逆变侧，正常情况下直流电压控制控制整流侧的直流电压为设定值，用作控制变量的整流侧直流电压通过计算得到。当整流侧处于最小 ALPHA 限制时，逆变侧会切换到直流电流控制，为了使逆变侧控制方式平滑转变，极控系统中提供了电流误差控制 (Current Error Characteristic) 功能。该功能是逆变侧电压控制的一部分，当电流控制器的输入误差大于 5% 后，逆变侧的电压参考值会减去一个与电流控制误差成比例的调制量。

当逆变侧交流电压降低时，为了避免熄弧角小于最小参考值，逆变侧熄弧角控制器将取代电压控制器。这种情况下可能会出现瞬时的换相失败。当交流电压增加时，逆变侧电压控制器将通过减小触发角来维持整流侧电压保持为参考值，换流变分接头控制会调节熄弧角值，这种情况下不会发生控制方式的切换。

### 3.3 熄弧角控制

熄弧角调节器是逆变侧采用的一种调节方式，该调节器只在熄弧角降低到熄弧角最小值以下时投入，熄弧角调节器投入后会将熄弧角恢复到参考值以上，这样可以更好地防止换相失败的发生。云广工程中的熄弧角参考值设置为  $17^\circ$ ，这个值必须和分接头角度控制设定相配合以避免干扰，它必须低于分接头的整定值，以防止熄弧角在分接头控制动作之前对熄弧角进行控制。

云广工程熄弧角控制使用实测型的熄弧角，通过测量从每个阀的电流过零到电压过零的时间，得到了每个阀实际的熄弧角的大小。当熄弧角降低到参考值以下时，如果熄弧角控制器被选择，则控制

器会通过减小触发角使熄弧角恢复到参考值。

### 3.4 控制器间协调

根据西门子基本控制策略，阀组控制主要由三个基本控制器组成：电流调节器，电压调节器和熄弧角调节器。为了得到理想的  $U_d/I_d$  特性曲线，需要三个调节器协调配合来完成两侧触发脉冲的产生，如图 4 所示。在云广工程中三个控制器共用一个 PI 调节器。整流侧选取  $\Delta I_d$  和  $\Delta U_d$  中的最小值作为调节器的输入，而逆变侧选择  $\Delta I_d$ ， $\Delta U_d$  和  $\Delta \gamma$  中的最大值作为调节器的输入。通过共用同一个 PI 调节器的方式，可确保输出的触发角指令在任何情况下都不会发生突变。在不同的运行模式（整流/逆变）下，选取不同的输入值 ( $\Delta I_d / \Delta U_d / \Delta \gamma$ ) 时，PI 调节器的比例常数和积分常数是不同的。调节器的最终输出为触发角指令。运用这种调节器配合方式，当有效控制器在电流/电压/熄弧角调节器之间切换时，这种变化过程是平稳的，不会引起触发角指令的突变，也不会使输送的功率产生任何不希望的波动。

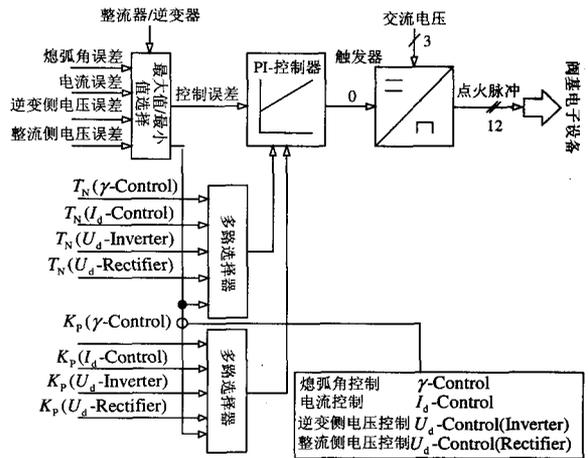


图 4 控制器间协调

Fig. 4 Coordination between controllers

### 3.5 换流变分接头控制

换流变分接头控制是配合阀组控制的一种慢速控制，约 5~10 s 每步，并具有台阶效应，分为手动模式和自动模式。分接头控制的目的是保持触发角、熄弧角和直流电压在一定的范围内。由于分接头调节的步进特性，在角度控制和电压控制中均提供合适的死区以避免分接头的来回调节<sup>[3,4]</sup>。

手动控制模式是指在分接头升降允许情况下，运行人员可以手动地升降分接头。在手动控制模式下的分接头升降也要受到最大换流变阀侧理想空载电压  $U_{d10}$  (No-load DC voltage) 的限制。

自动控制模式是指控制系统根据系统运行工况

自动调节换流变分接头档位。在自动控制模式下,运行人员不能手动升降分接头。自动控制模式下的分接头调节主要包括角度控制、 $U_{d10}$  控制以及起动力位置控制。

角度控制是一种标准的分接头控制模式,整流侧为  $\alpha$  控制,逆变侧为  $\gamma$  控制。当极解锁后,如果运行人员选择了角度控制,则该控制起作用。整流侧  $\alpha$  控制使触发角在  $12.5^\circ \sim 17.5^\circ$  之间,逆变侧  $\gamma$  控制使熄弧角在  $17.5^\circ \sim 21.5^\circ$  之间。如果实际的角度超过此范围则换流变分接头开始动作。为了避免快速响应,实际测量到的角度要经过 500 ms 的平滑滤波。

$U_{d10}$  控制就是维持计算得到的换流变二次侧电压 ( $U_{d10Calc}$ ) 在一定的电压范围内,如果计算的  $U_{d10Calc}$  小于下限参考值时,分接头降低,提高换流变二次侧电压,使其恢复到参考值范围内,反之分接头上升,使其恢复到参考值范围内。在自动控制模式下,当换流变断路器闭合后分接头控制将强制为  $U_{d10}$  控制,这可保证在换流器解锁以前,两侧的换流变二次侧电压在理想的电压水平。

#### 4 总结

本文以云广  $\pm 800$  kV 特高压直流工程为背景,针对其 12 脉串联双阀组主接线方式,详细分析了特高压直流系统在控制系统方面的功能配置和协调,包括双极控制层、极控制层和阀组控制层的功能及协调。双极层控制包括双极功率控制、稳定控制、功率方向控制、电流平衡控制、轻载无功优化等功能,主要产生用于控制的功率指令;极控制层包括极解锁/闭锁顺序、直流线路故障重启顺序、极电流限制、极电流协调、低压限流环节等功能,主要完成与极相关的控制功能,极控制层从双极控制层接收功率参考值并进一步产生阀组层控制所需的电压电流等参考值;阀组层主要配置为高速闭环控制功

能,包括直流电流控制、直流电压控制、熄弧角控制三个高速闭环控制器及慢速的换流变分接头控制等。特高压直流系统控制功能的分层结构,为其复杂的运行方式提供了方便。此外,本文还讨论了特高压直流输电系统与常规直流输电系统的不同之处,以充分发挥其双阀组的结构优点,最大可能地提高特高压直流系统的输电容量。

#### 参考文献

- [1] 陈潜,张尧,钟庆,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J].继电器,2007,35(16):27-32.  
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of  $\pm 800$  kV UHVDC System Under Different Operation Modes[J].Relay, 2007,35(16):27-32.
- [2] ED4 341 CS-C, 云广工程直流极控系统设计规范书, [S]. 2007..  
ED4 341 CS-C, Yunnan-Guangdong Line  $\pm 800$  kV DC Transmission Project C/P Design Specification[S].
- [3] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.122-136.  
ZHAO Wan-jun. HVDC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 122-136.
- [4] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 138-183.  
DAI Xi-jie. Introduction of DC Trans[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990. 138-183.

收稿日期: 2009-03-16; 修回日期: 2009-04-06

作者简介:

周君文(1968-), 男, 工程师, 从事高压直流控制设计;  
E-mail: zhoujunwen@xjgc.com

刘涛(1978-), 男, 工程师, 从事高压直流软件设计;  
李少华(1982-), 男, 从事高压直流输电系统研究。

(上接第 65 页 continued from page 65)

- [11] 庞浩, 李东霞, 俎云霄. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.  
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An Improved Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Using FFT Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.
- [12] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.

ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3):63-66.

收稿日期: 2008-06-25; 修回日期: 2008-10-07

作者简介:

陈赞(1977-), 女, 博士研究生, 研究方向为电能质量及其控制; E-mail:hncy1023@tom.com

陈光大(1953-), 男, 博士, 教授, 研究方向为灵活电力系统。