

Analysis the Strategies of Double DC Coordinated Control for Xiluodu-Guangdong HVDC Project

Xianwu Cao

China Southern Power Grid Co., LTD. Extra-High Voltage Power Transmission Company Qujing Branch, Qujing
Email: caoxianwu@ehv.csg.cn

Received: Oct. 15th, 2012; revised: Nov. 5th, 2012; accepted: Nov. 13th, 2012

Abstract: The project of Xiluodu right station-Guangdong ± 500 kV double HVDC systems erected on the same tower is the first project that double HVDC systems erected on the same tower at home, its function of control and protection increased the double DC coordination control function in addition to all function of conventional DC project. This paper was written with the background of Xiluodu-Guangdong HVDC project, introduces the differences in control system layered structural between Xiluodu-Guangdong HVDC project and conventional DC engineering, from power modulation, double DC power control and reactive power control three field analyzes the double DC coordinated control strategy, the control strategy in the control host abnormal are given, and compared with the control strategy of conventional DC system.

Keywords: Direct Current Transmission; Control and Protection; Double-Circuit Transmission Line on the Same Tower; Control Strategy

溪洛渡送电广东直流输电工程双回直流协调控制策略分析

曹显武

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局, 曲靖
Email: caoxianwu@ehv.csg.cn

收稿日期: 2012年10月15日; 修回日期: 2012年11月5日; 录用日期: 2012年11月13日

摘要: 溪洛渡右岸电站送电广东 ± 500 kV 同塔双回直流输电工程是国内第一条同塔双回直流输电工程, 其控制保护除了常规直流工程所具备的全部功能外, 增加了双回直流协调控制功能。以溪洛渡送电广东直流输电工程为背景, 介绍了其与常规直流工程在控制系统分层结构上的差异, 从功率调制、双回功率控制和无功控制三个方面重点分析了双回直流协调控制策略, 给出了该控制系统在控制主机异常情况下的控制策略, 并和常规直流系统的控制策略进行了对比。

关键词: 直流输电; 控制保护; 同塔双回; 控制策略

1. 引言

溪洛渡右岸电站送电广东 ± 500 kV 同塔双回直流输电工程(以下简称溪洛渡送电广东直流输电工程)是国家“十二五”西电东送重点工程之一, 也是世界上首次采用两回 ± 500 kV 直流线路同塔双回架设、两个 ± 500 kV 换流站同期同址合建、两回直流共用接地极的输电工程。同塔双回输电具有节约用地, 管理方便,

有利于出线走廊集中布置^[1], 提高通道输送能力降低建设成本的优点^[2]。目前, 同杆并架技术在交流输电中得到了较多应用^[3], 但 ± 500 kV 直流输电工程采用同塔双回尚在起步阶段^[4], 双回直流控制系统统一平台的工程应用在国内尚属首例, 国内外对双回直流协调控制的研究和工程应用较少, 进行双回直流协调控制策略分析对同塔双回直流输电工程的运行维护具

有十分重要的意义。

2. 控制系统分层结构

常规直流输电工程根据 IEC 60633-1988^[5]来确定分层配置原则，控制层级包含了交/直流系统级、区域级、双极级、极级和换流单元级共五个层级^[6]，其分层控制示意图如图 1 所示。控制层级越低，其控制范围越小。

由于溪洛渡送电广东直流输电工程采用了同塔双回、共换流站建设的方式，为了更加方便的实现双回直流协同控制，该控制系统在常规直流控制系统的基础上新增了站层控制级，在双极级增加了后备双回直流协调控制功能，并且将区域级和交/直流系统级合并为系统层控制级，该控制系统分为阀组控制层、极控制层、双极控制层、站层和系统层共五个层级，其分层控制示意图如图 2 所示。

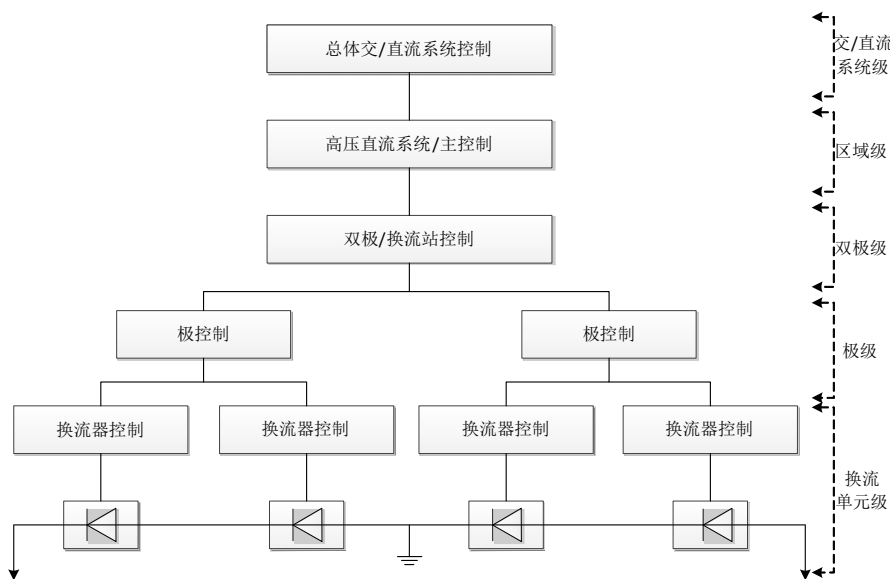


Figure 1. Conventional DC control system layered structure
图 1. 常规直流控制系统分层结构

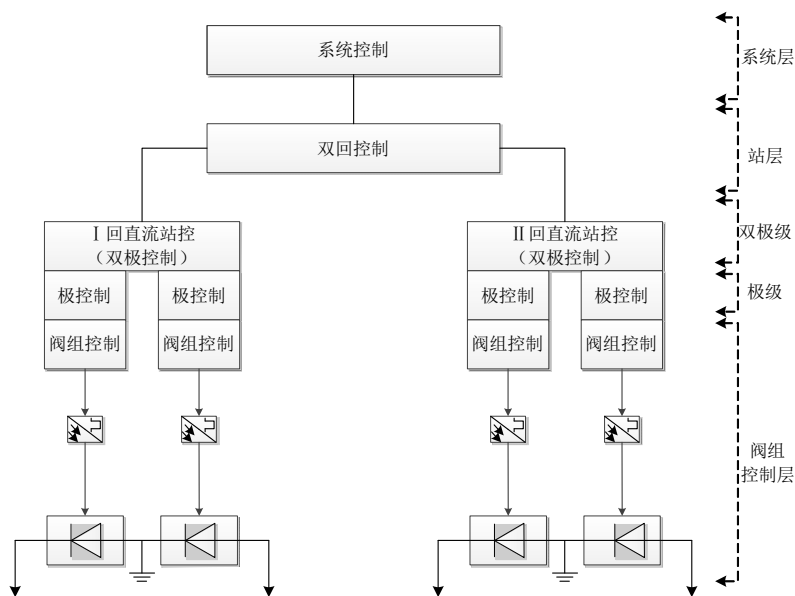


Figure 2. Xiluodu project control system layered structure
图 2. 溪洛渡工程控制系统分层结构

其中阀组控制层为控制系统的最低级，主要负责接受控制层的电流指令，再通过各种调节器进行运算、处理后，将触发脉冲指令发送给阀基电子设备 VBE；极控制层控制范围是一个极，主要向阀组控制层提供经计算的电流整定值，实现双极功率/极电流控制，极的起动和停运，故障处理和站间同极的远动通信；双极控制层的控制范围是同一回直流的两个极，主要功能有双回直流顺控，模式顺序的控制，后备无功控制，后备双回功率控制和后备功率调制控制等；双回控制层为最高级控制层，主要是对全站双回直流间有功功率的协调起动和停运，双回功率调制和无功控制等。

3. 双回直流协调控制策略分析

双回直流协调控制功能位于控制系统的站层控制级，主要包括功率调制、双回功率控制和无功控制三个功能，其与直流站控、极控的关系如图 3 所示。

同时该控制系统还在双极级配置了后备双回直流协调控制功能，在站层控制级功能失去后承担双回直流协调控制功能，以维持双回直流的运行。

两回直流正常运行时，作为一个整体运行，通过双回直流协调控制功能控制两回直流间的有功功率的分配；在安稳装置输入功率调制信号时，把调制功率分配到两回直流中，同时负责维持换流站和交流系统的无功交换量或换流站交流母线电压在设定的范围内，其详细功能描述如下：

3.1. 功率调制

功率调制功能是除了基本控制模式和基本控制方式外，直流控制系统设计并提供的附加的调制控制功能，主要包含：功率提升、功率回降、功率限制、频率限制、功率摇摆阻尼控制、次同步振荡阻尼控制、多直流协调控制和交流低电压限功率控制等 8 个功能。其输入信号主要来自于系统的安全稳定控制装置，

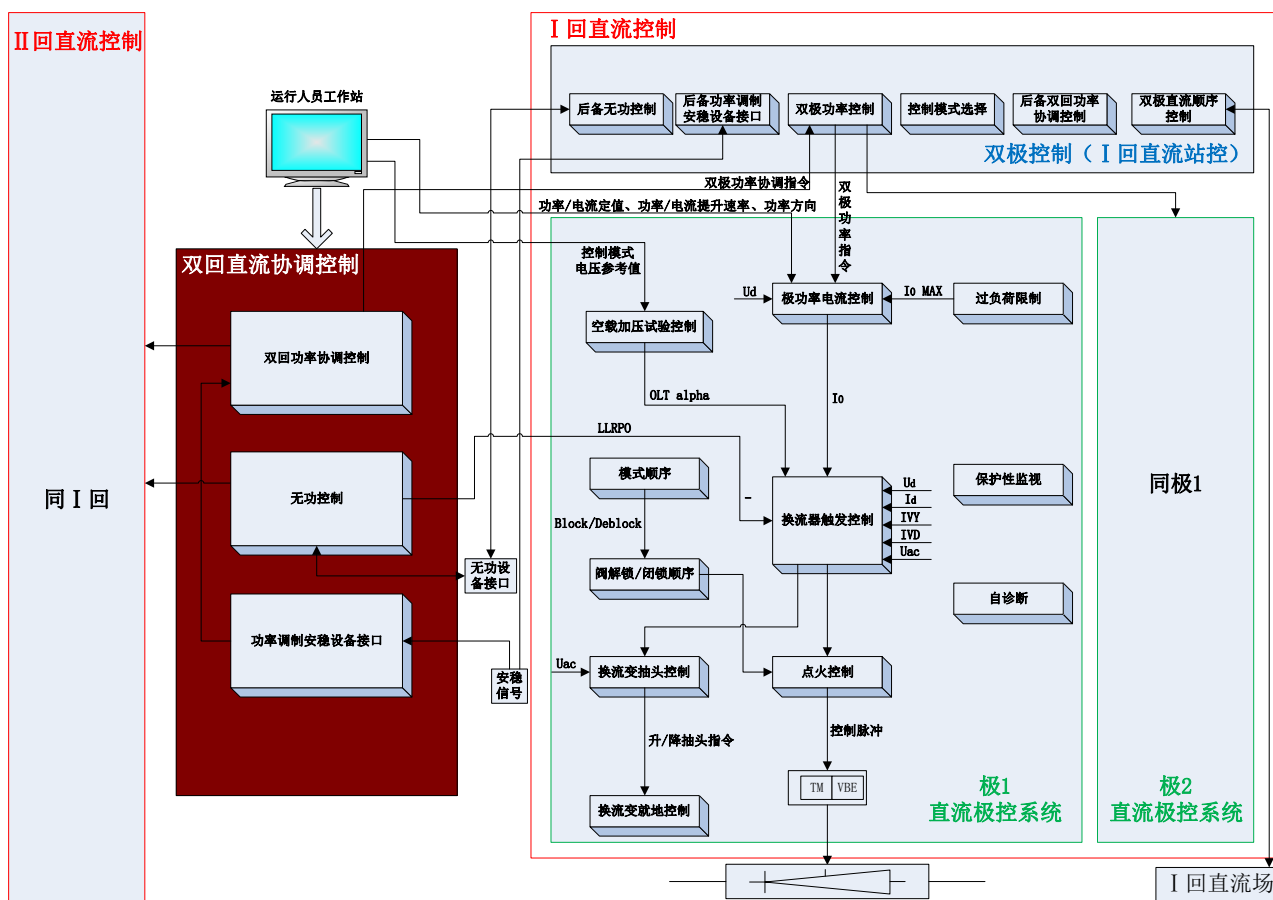


Figure 3. The relationship of double DC coordination control with station control and pole control
图 3. 双回直流协调控制功能与站控、极控的关系

或者通过对系统交流电压频率的监视产生。

该工程一共设置了 5 个功率提升档位、5 个功率回降档位和 3 个功率限制档位，功率提升/回降值及其速率、功率限制值均可通过运行人员工作站进行设置，功率调制功能是否投入可通过运行人员工作站进行操作，其中的每一档功率提升/回降/限制、频率限制、功率摇摆阻尼控制、次同步震荡阻尼控制交流低电压限功率控制功能是否投入也可通过运行人员工作站进行投退。两回直流间功率提升/回降值分配图如图 4 所示。

从图中可以看出，一回功率提升值计算公式为：

$$P_{\text{ramp1}} = P_{\text{ramp}} \times \frac{|U_{11}| + |U_{12}|}{|U_{11}| + |U_{12}| + |U_{21}| + |U_{22}|} \quad (1)$$

二回功率提升值计算公式为：

$$P_{\text{ramp2}} = P_{\text{ramp}} \times \frac{|U_{21}| + |U_{22}|}{|U_{11}| + |U_{12}| + |U_{21}| + |U_{22}|} \quad (2)$$

一回功率回降值计算公式为：

$$P_{\text{reduce1}} = P_{\text{reduce}} \times \frac{|U_{11}| + |U_{12}|}{|U_{11}| + |U_{12}| + |U_{21}| + |U_{22}|} \quad (3)$$

二回功率回降值计算公式为：

$$P_{\text{reduce2}} = P_{\text{reduce}} \times \frac{|U_{21}| + |U_{22}|}{|U_{11}| + |U_{12}| + |U_{21}| + |U_{22}|} \quad (4)$$

其中， P_{ramp1} 为一回功率提升值， P_{ramp} 为全站功率提升值， P_{ramp2} 为二回功率提升值， U_{11} 为一回极 1 直流电压， U_{12} 为一回极 2 直流电压， U_{21} 为二回极 1 直流

电压， U_{22} 为二回极 2 直流电压， P_{reduce1} 为一回功率回降值， P_{reduce} 为全站功率回降值， P_{reduce2} 为二回功率回降值。

3.2. 双回功率控制

双回功率控制的功能逻辑框图如图 5 所示，其中双回功率限制、双回功率指令和双回功率速率为运行人员通过操作界面输入的定值。功率调制有两路输出，一路与运行人员输入的双回功率指令进行叠加，另一路作为双回功率定值计算限幅环节的一个部分。限幅环节乘上每一回的功率分配系数即为每回直流的功率指令，通过双回控制 LAN 送到每回直流站控。

3.2.1. 双回直流协调起动

溪洛渡送电广东直流输电工程的双回直流协调起动的软件逻辑如图 6 所示，其中 NORM_PWR_DIR 表示正常功率方向即昭通 - 从化方向，SPC 表示双回功率控制，SPC_ENTER 表示双回功率控制功能投入，READY_START 表示该极满足启动条件，T1P1 表示直流 I 回极 1，T1P2 表示直流 I 回极 2，T2P1 表示直流 II 回极 1，T2P2 表示直流 II 回极 2，MASTER 表示主控站，OPN 表示运行状态，S_PWR_REF 为双回功率指令，MIN_S_PWR_REF 为双回功率控制指令下限，S_PWR_RAMP 为双回功率提升/回降速率，MIN_S_PWR_RAMP 为双回功率提升/回降速率下限。“&”表示变量取与逻辑，“≥1”表示变量取或逻辑，“○”表示变量取反，“a ≥ b”表示输入变量 a ≥ 输入变量 b 时输出为“1”，反之则为“0”。

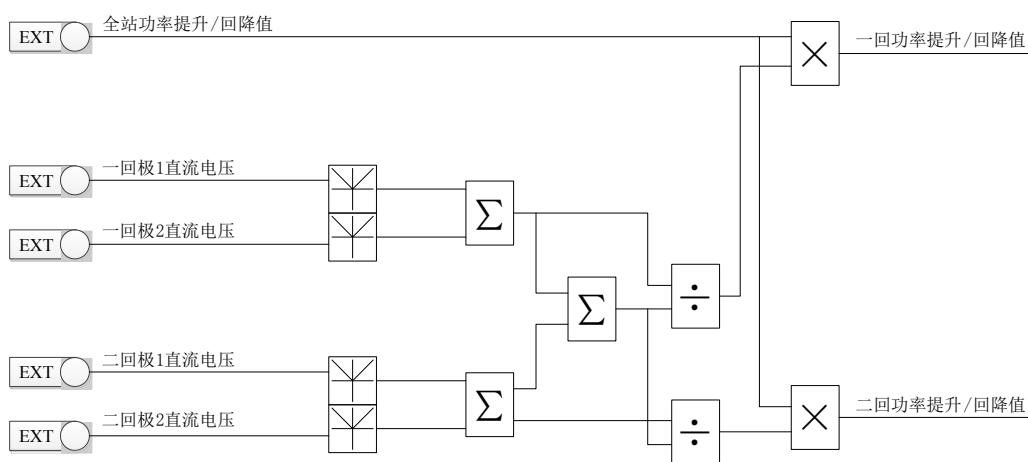


Figure 4. Between double DC runup/runback value distribution
图 4. 两回直流间功率提升/回降值分配

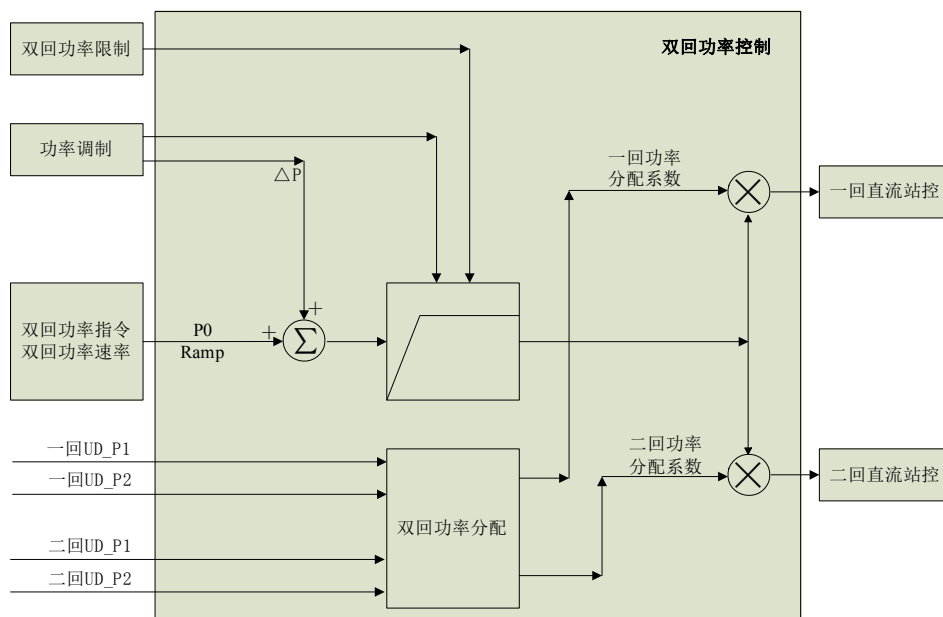


Figure 5. Double DC power control logic
图 5. 双回功率控制逻辑

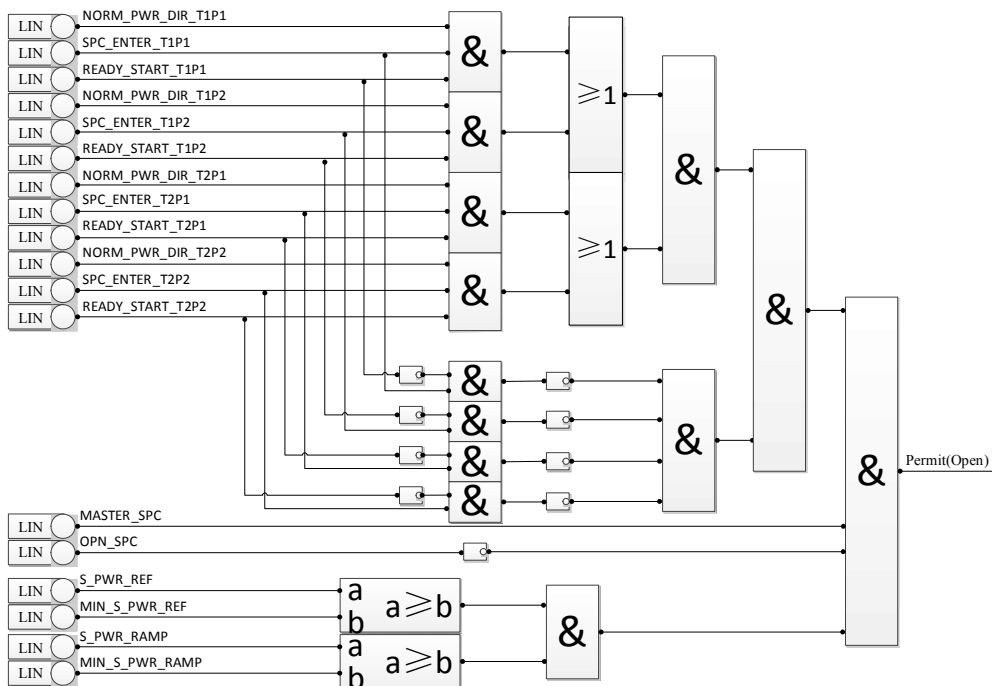


Figure 6. Software logic of double DC coordinate starting
图 6. 双回直流协调起动软件逻辑

从图中分析我们可以看出，允许双回直流协调起动的条件由以下五个条件取与逻辑构成：每回直流至少有一个投入双回功率控制且同功率方向的极满足 RFO 状态，四个极均未投入双回功率控制或均满足 RFO 状态，两回直流的主控站一致，两回直流不在单

极同极性大地回线 RFO 状态，功率参考值和功率提升速率均大于下限值。因此，当两回直流的主控站和功率方向一致时，至少有一回投入双回功率控制模式，且投入双回功率控制的一回直流中至少有一个极满足 RFO 状态时才允许双回直流协调起动，当两回

直流进入单极同极性大地回线 RFO 状态时, 不允许双回直流协调起动。

3.2.2. 双回直流协调停运

溪洛渡送电广东直流输电工程的双回直流协调停运的软件逻辑如图 7 所示, 其中各变量的说明同 3.2.1。从图中分析我们可以看出, 允许双回直流协调停运的条件由以下四个条件取与逻辑构成: 每回直流至少有一个极运行在双回功率控制模式且处于系统级控制, 四个极均不在运行状态或四个极均在系统级控制模式下投入双回功率控制, 两回直流的主控站一致, 功率提升速率大于下限值。因此, 当两回直流主控站一致, 且运行的极均投入双回功率控制时允许双回直流协调停运。

3.3. 双回直流无功控制

溪洛渡送电广东直流输电工程换流站容性无功补偿容量的确定原则如式(5)所示:

$$Q_{total} \geq \frac{Q_{ac} + Q_{dc}}{(k)^2} + NQ_{sb} \quad (5)$$

其中: Q_{total} 为正常电压下交流滤波器和并联电容器所能提供的总的无功。 Q_{ac} 为决定无功供给设备容量时所假设的交流系统无功需求(如果该值为负, 则表示交

流系统可向换流站提供无功的能力, Mvar)。 Q_{dc} 为决定无功供给设备时所假设的直流换流设备的无功需求(Mvar)。 N 为备用无功补偿设备组数。 Q_{sb} 为备用小组容量, 在正常电压下, 由最大的交流滤波器分组或并联电容器分组所提供的无功(Mvar)。 k 为相应的电压修正系数。

溪洛渡送电广东直流输电工程换流站的感性无功设备容量由式(6)确定:

$$Q_r \geq Q_{fmin} - \frac{Q_{ac} + Q_{dc}}{(k)^2} \quad (6)$$

其中: Q_r 为正常电压下, 换流站感性无功补偿设备所能吸收的总无功(Mvar)。 Q_{fmin} 为正常电压下, 由交流滤波器产生的无功(Mvar)。 Q_{ac} 为计算无功吸收设备时, 允许从换流站流进交流系统的最大无功(Mvar)。 Q_{dc} 为决定无功供给设备时所假设的直流换流设备的无功需求(Mvar)。 k 为相应的电压修正系数。

可以看出: 换流站的容性无功补偿容量主要取决于直流满负荷运行时的无功消耗和交流系统的容性无功支持能力。感性无功补偿容量主要取决于直流小负荷运行时的无功消耗、投入的滤波器容量和交流系统的感性无功支持能力, 溪洛渡送电广东直流输电工程按直流小方式运行时投入 2~3 小组滤波器考虑。

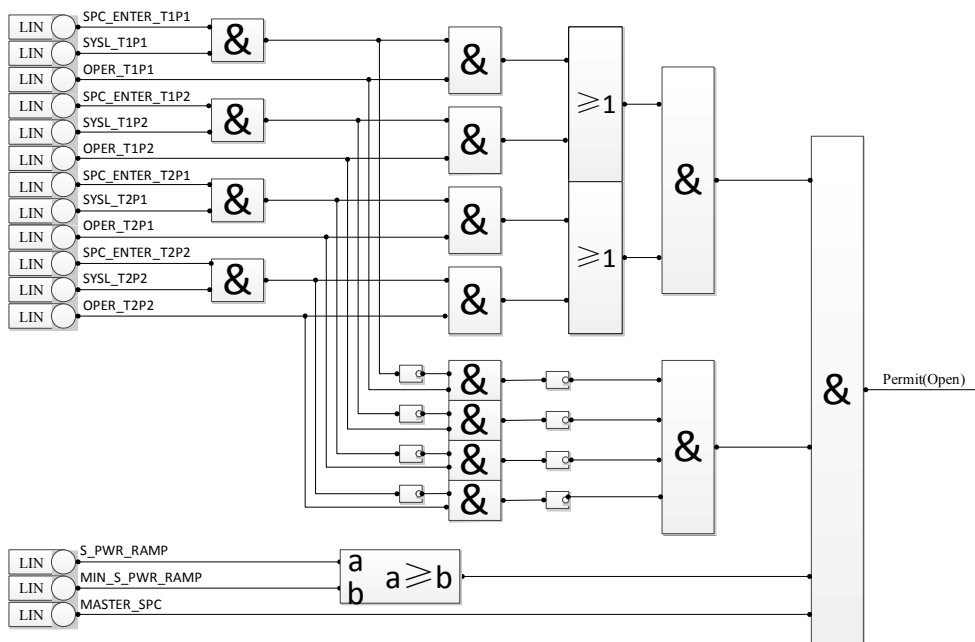


Figure 7. Software logic of double DC coordinate stopping
图 7. 双回直流协调停运软件逻辑

因此，与系统交换的无功功率可用式(7)表示：

$$Q_{sys} = Q_r - Q_{total} \quad (7)$$

其中， Q_{sys} 为与系统交换的无功功率。

由于本直流工程四个阀组之间耦合性不强，且共用一个交流滤波器场，因此，滤波器投切裕度比其他工程略大，为 20%~30%。在投滤波器之前，对投入的滤波器按式(8)进行无功预计算。当式(9)条件满足后，经过一定延时后投入滤波器，配合裕度功能，能有效抑制滤波器频繁投切^[7]。

$$Q_{next_filter} = \left(\frac{U_{measure}}{U_{normal}} \right)^2 Q \quad (8)$$

$$Q_{sys} - Q_{next_filter} - Q_{margin} > Q_{min} \quad (9)$$

式中： Q_{next_filter} 为投入滤波器的无功功率； $U_{measure}$ 为测量电压值； U_{normal} 为正常电压值； Q 为滤波器组额定无功功率； Q_{sys} 为与系统交换的无功功率； Q_{margin} 为无功裕度值； Q_{min} 为无功功率死区的最小值。

其控制曲线如图 8 所示。

为了满足所有情况下无功控制的需求，溪洛渡送电广东直流输电工程的无功控制采用了 U max、Abs Min Filter、Min Filter 和 Q control/U control 四种控制功能。U max 为最高/最低电压限制，其主要作用是监视交流母线的稳态电压，避免稳态过电压引起保护动作。Abs Min Filter 为绝对最小滤波器容量限制，是为了防止滤波设备过负荷所需投入的绝对最小滤波器组数。任何情况下，该条件必须满足。Min Filter 是最小滤波器容量要求，为满足滤除谐波的要求需投入的

最小滤波器组。Q control/U control 为无功交换控制/电压控制，主要是控制换流站和交流系统的无功交换量或换流站交流母线电压在设定的范围内。

其中 U max 和 Abs Min Filter 在手动或自动模式下功能均有效，Min Filter 和 Q control/U control 功能仅在自动控制模式下有效，Q control 和 U control 不能同时有效，具体选择哪一种控制模式由运行人员在工作站进行选择。

3.4. 控制主机异常时的控制策略

控制系统的状态有运行、备用、服务和试验四种状态。处于运行状态的系统为当前运行的系统，只有该系统发出的控制命令才有效，正常运行时只能有一套系统处于运行状态。备用状态为当前处于热备用的系统，服务状态为当前处于服务状态的系统，处于运行状态或备用状态的系统也一定处于服务状态，试验状态为当前处于测试状态的系统，当系统发生故障时，运行人员手动将该系统切至试验状态以进行检修处理。

控制系统发生的故障按严重程度分为轻微故障、严重故障和紧急故障。轻微故障不会影响任何控制功能的不可用，发生严重故障时若另一系统可用则进行切换，若另一系统不可用则该系统可继续维持运行，不影响功率输送，发生紧急故障时将不能维持直流系统继续运行。

直流控制系统切换的基本原则是：在任何时候运行的有效系统应是双重化系统中较为完好的那一重系统。

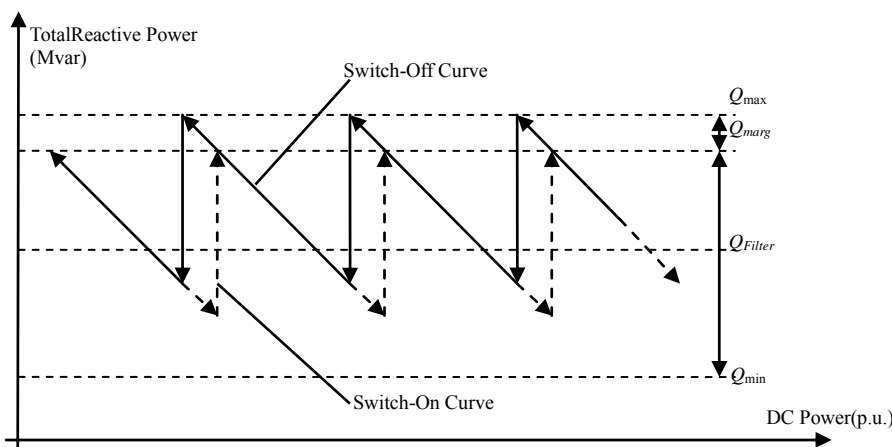


Figure 8. Reactive power control curve
图 8. 无功功率控制曲线

双回直流协调控制主机异常时的控制策略主要分为控制系统可用和不可用两种情况，其中可用指的是两套控制系统均可用或有一套可用，即至少有一套系统处于运行或备用状态，不可用指的是两套控制系统均不可用，即两套系统均不在运行或备用状态。下面将分别阐述两种情况下的控制策略。

3.4.1. 系统可用时的控制策略

当两套系统中的一套出现轻微故障时，若另一套系统未出现任何故障，则系统发生切换，原运行系统自动切换至备用状态，原备用状态系统切换至运行状态，否则不切换；当两套系统中的一套出现严重故障时，若另一套系统未出现故障或仅为轻微故障，则系统发生切换，原运行系统切换至服务状态，待故障消除后自动进入备用状态，原备用状态系统自动切换至运行状态，否则不切换；当两套系统中的一套出现紧急故障时，若另一套系统未出现故障或仅为轻微故障，则系统发生切换，原运行系统自动退出至服务状态，原备用系统自动投入运行，否则判断为两套系统均不可用，该运行系统自动切换至服务状态，此时的控制逻辑见 3.4.2；当系统出现故障需要检修时，由运行人员手动切至试验状态后方可进行，试验完毕后，应手动切至服务状态，若故障已消除，则系统可自动切至备用状态。

3.4.2. 系统不可用时的控制策略

若两套系统中的一套发生紧急故障时，若另一套系统此时仍有严重或紧急故障，则判为两套系统均不可用。在直流站控中，配置了后备功率调制、后备双回功率控制和后备无功控制功能，当双回直流协调控制系统可用时，这三个功能均无效，当双回直流协调

控制系统不可用时，直流站控系统后的后备功率调制、后备双回功率控制和后备无功控制将起作用。

直流站控系统后的后备双回协调控制功能是通过选取其中的某一回直流系统作为主导回，非主导回直流站控系统的后备双回协调控制功能处于后备状态，并与主导回保持同步。直流站控系统后的后备双回直流协调控制功能与双回直流协调控制系统的功能基本一致。

4. 结论

与常规直流控制系统相比，溪洛渡送电广东直流输电工程在控制保护系统方面增加了双回直流协调控制系统，并且在直流站控系统中增加了后备双回协调控制功能，首次采用了双回功率控制方式，实现了直流控制保护系统新的突破。本文对溪洛渡送电广东直流输电工程的控制保护策略做了具体分析，对以后同塔双回直流输电工程控制保护系统的设计及其换流站的运维管理具有重要的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 胡丹晖, 涂彩琪, 蒋伟等. 500 kV 同杆并架线路感应电压和电流的计算分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1927-1931.
- [3] 舒印彪, 赵丞华. 研究实施中的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 49-52.
- [4] 石岩, 王庆, 聂定珍等. ± 500 kV 直流输电工程同杆并架技术的综合研究[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 1-6.
- [5] IEC. IEC60633-1998, Terminology for high-voltage direct current (HVDC) transmission. Geneva: IEC, 1998.
- [6] 王春成. 共换流站 ± 500 kV 同塔双回直流输电工程控制系统的分层结构[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 74-79.
- [7] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.