

# 共换流站双回直流输电工程直流控制系统优化研究

胡蓉

(中国南方电网超高压输电公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 针对溪洛渡右岸电站送电广东直流工程两回直流共起落点、共换流站、直流线路同塔双回并架的工程特点, 从系统运行方式、直流控制系统的结构与功能配置等方面和单回直流工程进行分析、比较, 在此基础上, 进一步研究了双回直流控制系统的分层结构、功能配置以及系统协调控制的原则、策略等。提出了双回直流工程控制系统的硬件配置方案, 最终给出了新增两个双极间协调控制功能, 采取备用功能和回间隔离等直流控制系统的优化措施。配置方案和优化措施已在实际工程得到应用。该研究对后续该类工程控制保护系统的设计、施工、运行维护方面具有一定的指导意义。

**关键词:** 共换流站; 同塔双回; 直流; 控制; 优化

## Analysis and optimization of DC control system in adopting common converter station same-tower double-circuit HVDC transmission project

HU Rong

(CSG EHV Company, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** For the purpose of improving the reliability and satisfying the stage construction requirements of the  $\pm 500$  kV Xiluodu-Guangdong Same-tower Double-Circuit HVDC Transmission Project, based on its characteristic of sharing common start point, end point, and converter station, and with the incorporation of the system control plan of ordinary HVDC projects, a study is carried out to analyze and compare the system operation mode, DC control system structure as well as function configuration of the project. This paper emphasizes on the control system differences between the ordinary HVDC projects and the aforementioned one, in which the hierarchical structure, function configuration, principle and strategy of coordination control in double-circuit DC system are studied. The optimization measures for the DC system operation mode is proposed, mainly introducing the coordination control and standby function of the two poles, and isolating the two circuits. The research result will serve as a guide for the design, implementation, operation and maintenance of the control and protection system of such a project.

**Key words:** common converter station; same-tower double-circuit; HVDC; double-circuit control; optimization measures

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0121-06

## 0 引言

国内继葛-沪 $\pm 500$  kV 直流输电工程后, 已经先后建设了多个 $\pm 500$  kV 直流输电工程, 近年更有多个特高压直流工程建设投运; 直流输电工程已经成为电网中重要的组成部分, 在西电东送输电工程和电力系统联网方面发挥了重要的作用。国内第一条双回直流 $\pm 500$  kV 溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程也于2014年6月25日建成投产; 该工程具有双回配置, 直流线路共起点、落点, 直流线路同塔并架, 双回直流共用接地极等多个特点, 相应的直流控制系统设计中也有较多特殊策略; 与常规单回直流输电工

程相比, 控制策略方面也需要有较多优化。

针对以上工程特点, 对共换流站的直流控制系统的结构、功能配置等进行了深入的分析研究, 并针对本工程的特点提出控制系统的一些优化措施。

## 1 溪洛渡工程概况及特点

### 1.1 工程概况

溪洛渡右岸电站送电广东直流输电工程(下面简称溪洛渡直流工程), 采用双回直流系统共建, 两回直流共起点、共落点、共换流站、共用接地极, 两回直流线路及两回直流系统接地极线路均为大部分线路同塔并架, 直流输电容量 $2 \times 3200$  MW, 直流

线路长度  $2 \times 1286$  km。换流站额定直流电压  $\pm 500$  kV, 换流变压器交流侧接于交流 500 kV 母线。全站 2 回  $\pm 500$  kV 直流出线, 每回直流出线采用双极配置, 每极 1 个 12 脉动阀组, 通过 1 组 YNy 和

YNd 换流变压器与 500 kV 交流场连接。换流站共设 20 个滤波器/电容器小组, 分成 4 大组分别接入 500 kV 串中。全站电气主接线如图 1 所示。

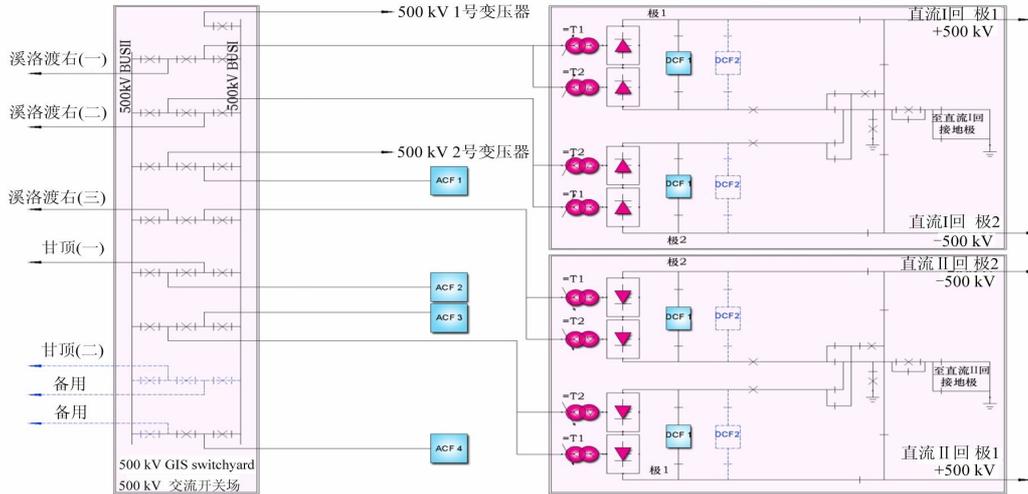


图 1 溪洛渡直流工程主接线示意图

Fig. 1 Wiring diagram of Xiluodu HVDC project

### 1.2 工程特点

与国内常规  $\pm 500$  kV 高压直流换流站(以下简称常规直流)进行对比,  $\pm 500$  kV 溪洛渡直流工程每回直流系统的基本运行方式与常规直流相同, 但全站双回直流系统的运行方式组合将明显增加很多, 详见表 1。每回直流  $\pm 500$  kV 直流场设备相对独立; 全站双回直流系统共用 500 kV 交流场; 两回  $\pm 500$  kV 直流线路采用同塔双回架设; 两回直流系统共用接地极; 两回接地极线路为同塔架设。

全站的两回直流系统既是相互独立的, 同时也有着较紧密的联系。相应地, 其直流控制保护系统的分层结构和功能配置较常规直流换流站更为复杂; 在控制系统设计中需要考虑双回直流间的协调

配合, 同时与常规直流相比, 在可靠性方面也有更高要求。

### 2 双回直流系统基本运行方式

根据系统要求, 每回直流系统双极平衡运行(P1 + P2)、单极大地回路运行(P1GR 或 P2GR)、单极金属回路运行(P1MR 或 P2MR)为系统的基本运行方式。

对本工程而言, 考虑到两回直流系统既可以作为一个整体进行运行, 也可以两个独立的直流系统单独运行, 在此情况下, 则可能有更多种运行方式组合。

两回直流系统同时运行可能的的基本运行方式组合如表 1 所示。

表 1 双回直流运行方式组合

Table 1 Double-circuit HVDC operation mode combination

运行方式组合	直流 I 回				
	P1+P2	P1GR	P2GR	P1MR	P2MR
直流 I 回	√	√	√	√	√
直流 II 回	√	※	√	√	√
	√	√	※	√	√
	√	√	√	√	√
	√	√	√	√	√

表 1 中, 标为“√”的运行方式组合, 是各种可能的运行方式; 标为“※”的运行方式组合, 即两回直流同时采用同极性单极大地回路运行方式, 由于考虑到共接地极的因素, 不建议实际运行时采用。

双回直流系统的各种运行方式组合将比常规直流大大地增加, 而运行方式组合的增加将对控制保护系统的分层结构、功能配置、软硬件设计、运行控制等方面产生较大影响。下面将重点讨论控制保护系

统的硬件分层结构、优化双回直流系统的运行方式组合和协调配合控制、及双回直流系统的保护配置。

### 3 双回直流控制系统分层与配置研究

#### 3.1 直流控制系统的功能分层

双回直流输电工程的控制保护系统整体分层结构不变,但是直流控制系统每层设备的配置会略有改变。结合双回直流系统的设计特点,根据 IEC60633:1998 中确定的功能分层配置原则,直流控制系统分成四个层次:站系统控制层(即双回控制层)、双极控制层、极控制层、阀组控制层。由于每极只有一个阀组,工程中将极控制层和阀组控制层的功能放在同一层中。

从表 1 的运行方式的描述可以知道,两回直流系统可以作为常规的直流工程单独运行,同时两回直流系统又需要保证在双回协调控制下运行,因此就功能分层来说,需要在常规直流输电双极层的上面再加上双回直流控制层,该层里要配置两回直流的功率协调控制功能以便于对整个站的总功率进行双回直流功率协调控制。由于两回直流系统共用交流场及交流滤波器组,无功控制存在强耦合,双回直流的无功控制功能需由双回直流系统的协调控制完成。两回直流系统共用接地极,其接地极电流也需要双回直流系统的协调控制。而且,两回直流系统的运行方式组合明显增加很多,双回直流系统运行方式的相互协调和切换也需要双回直流系统的协调控制功能来完成。此外,由于本工程共用交流场,所以在双回直流控制层需实现双回直流输电系统的稳定控制功能及与外部安稳装置的接口。

#### 3.2 直流控制系统各层的功能配置

站系统控制层(即双回直流控制层)执行和双回直流系统相关的控制功能,主要有两回直流输电系统之间的同步协调控制功能,无功功率控制功能和共用接地极的监视保护功能、稳定控制功能等。双极控制层、极/阀组控制层的功能配置与常规直流一致。

后备的双回控制功能设置:考虑到双回控制层失去时,两回直流系统都无法继续运行,所以应考虑在更低控制层设置后备的双回层控制功能。

#### 3.3 直流控制系统硬件配置方案分析

方案一:全站设置独立的双回直流控制层、双极控制层、极控制层,各层均采用冗余配置。双回直流控制层仅负责执行与双回直流系统相关的控制功能;双极控制层执行单回直流系统与双极控制相关的控制功能;极控制层/阀组控制层的功能与常规直流工程基本一致。

方案二:全站设置独立的双回直流控制层、极

控制层,各层系统均为冗余配置。双回直流控制层仅负责执行与双回直流系统相关的控制功能;双极控制层功能下放到极控制层中,通过“选择主控极”保证只由一个极控完成双极功能。

方案一中直流控制系统的分层结构最为清晰,各控制层之间交换的信息也相对较少,该方案的配置充分考虑了直流控制系统的可靠性,且该方案更能体现双回直流系统的特点,本工程直流控制系统分层配置采用方案一。

### 4 双回直流协调控制策略研究

双回直流输电系统和常规单回直流输电系统在控制功能分层上的差别就是在双极层之上增加了双回直流控制层。双回直流系统中每回直流即一个双极的直流控制策略与常规直流是一致的,双回协调控制策略必须满足双回直流输电系统的运行要求。双回协调控制策略应该包括:双回直流输电系统的启动策略、双回直流输电系统的停运策略、双回直流输电系统的紧急停运策略以及双回直流输电系统的稳定控制功率分配策略。

#### 4.1 双回直流输电系统功率协调控制原则

运行人员设置站总功率参考值。双回直流系统控制层根据每回直流系统的电压值分配相应的功率参考值到双极控制层。双回直流系统平衡运行时,则两回直流系统均分总的功率指令;不平衡运行时,每回直流系统分配到的功率参考值和其总电压值成正比。协调控制分配的是两回直流系统的功率参考值,因此每回直流系统至少有一极应运行在同步运行模式下。双极层接收到分配的功率后根据本回直流每一极的运行方式再分配,其分配原则与常规直流一致。

为了保证独立运行和同步运行间的转换平滑无扰动,设置了双回直流控制层的功率跟随功能,在双回直流输电系统独立运行时,总功率参考值需要跟随两回直流系统功率变化。在极层为了保证功率和电流模式的无扰动相互转换也设置的有参考值跟随功能,在功率模式下,电流参考值跟随实际电流值;在电流模式下,功率参考值跟随实际双极功率值。

功率协调控制的基本原则示意图如图 2 所示。

#### 4.2 双回直流输电系统启动控制策略

双回直流输电系统启动时,可采用两回直流同步启动方式或每一回直流系统先独立启动再转入双回直流协调运行控制的两种方式。两回直流同步启动方式可以实现双回两极、三极或四极的同步启动,前提是两回直流都处于同步控制模式下。可以手动设置整个站的功率参考值,站系统控制层根据每

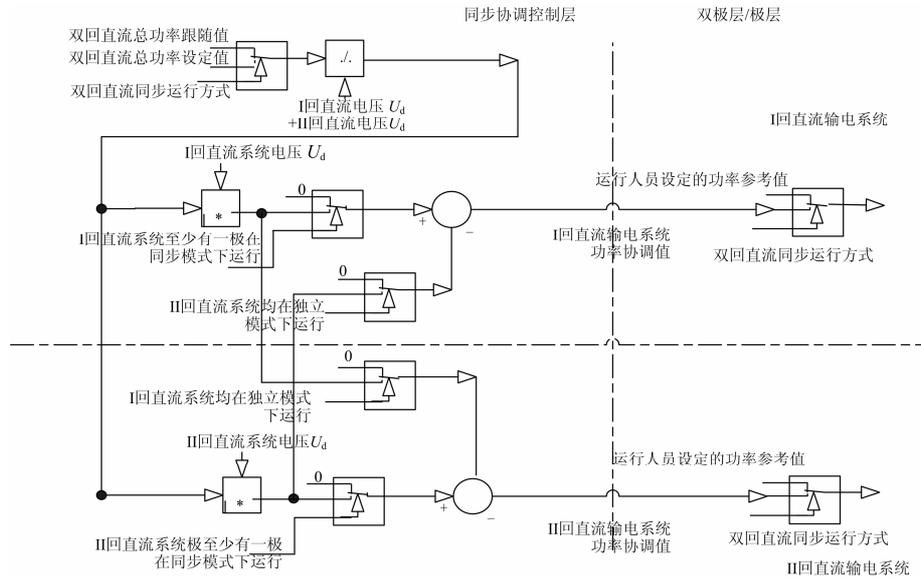


图 2 功率协调控制基本原则

Fig. 2 Basic principle diagram of power coordinated control

回直流系统的电压值分配相应的功率参考值到双极控制层。每回直流输电系统的独立启动顺序和常规直流一样。

当双回直流输电系统都已经单独启动后，可以手动将整个系统切换到同步控制模式下，并设置整个站总的功率参考值。

### 4.3 双回直流输电系统停极控制策略

在双回直流同步运行时，可采用两回直流同步停运方式或可采用先退出同步运行模式，让每一回直流系统独立运行，再执行闭锁停极顺序。两回直流同步停极方式可以实现双回两极、三极或四极的同步停运。

退出同步运行模式时，两回直流系统不再有功率的协调和分配。运行人员启动闭锁后，控制系统将按设定的斜率降低直流功率(或直流电流)参考值，这个过程在整流侧进行，当参考值降低到最小时，闭锁触发脉冲。极控系统接收到闭锁命令后会将对闭锁过程进行监视，如果在一定时间内闭锁没有完成，顺序控制发出停极失败信号。

当逆变侧极控系统检测到整流侧已经闭锁，执行逆变侧的阀闭锁顺序。

与常规直流系统一样，双回直流系统的换流器的闭锁顺序要求整流侧要先于逆变侧闭锁。因此要通过站间通信通道传递换流阀的状态信息。如果站间通信故障，由整流侧执行接收到的闭锁命令，按斜率下降直流功率参考值，当直流功率参考值达到最小值以下时，整流侧执行阀闭锁；逆变侧检测直

流电流低于最小值超过 60 s 后执行阀闭锁顺序。

### 4.4 双回直流输电系统同步运行时紧急停运控制策略

双回直流协调运行时某一极故障紧急停运时，功率协调功能根据直流运行状态的变化立即将损失的故障极功率按照剩余健全运行极的运行情况分配到其各自的功率参考值上，使健全极功率上升以承担故障极的功率损失。

对于整流侧，极控系统接收到 ESOF 信号以后，立即将触发角移相，并在 20 ms 以后闭锁换流阀。

对于逆变侧，接收到 ESOF 后按照逻辑立即投旁通对(如果直流保护没有禁止投旁通对)，并在 1200 ms 以后闭锁换流阀。

当站间通信故障时，本站的 ESOF 信号只能启动本站的动作顺序。整流侧 ESOF 启动，逆变侧靠直流零电流保护闭锁。逆变侧启动 ESOF，整流侧靠直流低电压保护闭锁。

当直流保护有禁止投旁通对信号时，在逆变侧 ESOF 时不能投入旁通对，此时逆变侧将自己的 ESOF 信号送往整流侧，并在 1200 ms 以后闭锁换流阀。如果通讯故障，整流侧远方站故障检测功能将会闭锁整流侧。

### 4.5 双回直流输电系统稳定控制功率分配策略

双回直流输电系统的稳定控制功能在站系统控制层实现。双回直流的整流侧和逆变侧均设置有稳定控制功能，控制系统通过站间通讯将逆变侧生成的稳定控制功率参考值送到整流侧，与整流侧产生的稳定控制参考值相加形成最终的稳定控制参考

值。双回直流控制层再根据每一回直流系统的电压分配相应的功率调制量。无论双回直流系统是独立控制还是同步控制，稳定控制的功率分配功能都可以起作用。每个站的运行人员都有可以对稳定功能

进行投入/禁止。当站间通讯正常时，两个站的稳定功能均可以正常投入起效；当站间通讯故障时，整流侧的稳定功能仍可以被投入起效。稳定控制功率同步协调控制示意如图 3 所示。

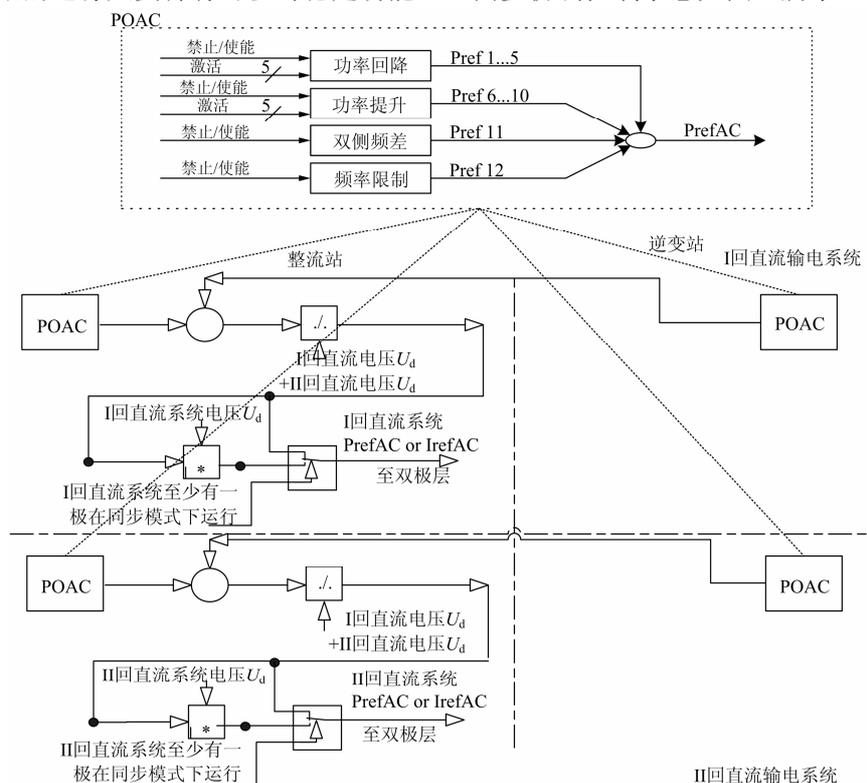


图 3 稳定控制功率同步协调控制示意图

Fig. 3 Control diagram of stability control power synchronous coordination

## 5 双回直流控制系统优化措施

双回直流控制系统依据第 3 节所述分层结构及功能配置, 及第 4 节所述的双回功率分配协调策略、稳定控制相关功率分配策略、双回启动、停运等策略等, 能够实现双回直流所需的控制功能, 保证双回直流的正常运行。溪洛渡双回直流工程设计和实施过程中, 考虑到双回直流所输送的直流功率巨大, 异常停运对于送端和受端两侧的交流电网都将产生巨大冲击, 故对直流控制系统进行了进一步优化, 以提高控制保护系统的运行可靠性。

### 5.1 备用功能配置

如第 3 节所述, 双回层的功能, 如双回功率控制、无功控制和功率调制(含稳定控制接口), 均配置在双回控制层设备中。如双回控制层设备故障, 将导致双回直流四个极全部停运, 造成巨大的功率损失。为解决该问题, 对双极控制层配置的控制功能进行优化; 在原有功能配置基础上增加了后备双回功率控制、后备无功控制和后备功率调制功能,

如图 4 所示。

双回控制层冗余设备中任一处于有效值班状

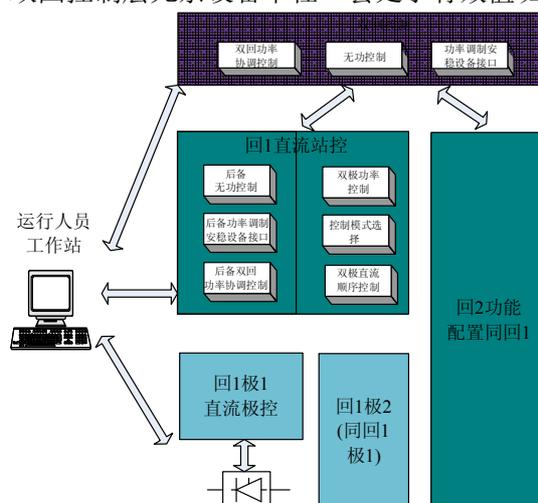


图 4 双回控制备用功能配置图

Fig. 4 Double-circuit HVDC control standby function configuration diagram

态时，上述双极控制层设备 DCC 中的后备控制功能均不起作用，但保持了热备用和对双回控制层的状态跟随；在极端情况下 STC 冗余设备完全失去时，两回直流的 DCC 中，主导回的 DCC 中的相关后备功能自动启动，无缝实现双回相关功能的接管，相关后台通讯也自动进行关联设备的切换；确保了双回相关控制功能正常运行，双回直流的安全可靠运行不受任何影响。

### 5.2 控制系统回间隔离措施

双回直流包括了两回双极直流，共有四个极。实际建设过程中，往往需要分期建设。以溪洛渡工程为例，现场建设调试从 2013 年持续到 2014 年，各极分期建设，分别调试和投运。本工程由于具有四个极，各极通过双极控制层和双回控制层及各层间的相互通讯完全连接到了一起；在分期建设中如何避免一极调试对其他所有极的影响，是一个需要重点关注的问题。

为解决该问题，对控制系统进行了进一步优化。除给每极配置了极检修功能外，每回也配置了回检修功能，如图 5 所示。极检修功能投入后，该极极控系统中断与之相连的所有主机的通讯，同时闭锁一切信号出口；回检修功能投入后，该回的双极控制设备 DCC 和回内各极极控设备 PCP 与另外一回控制保护设备的通讯全部切断，同时本回所有控制系统主机的一切信号出口均闭锁。极检修或回检修功能投入后，确保本极或者本回的相关一次、二次设备检修调试对正在运行的极或回不产生影响，是保障双回直流分期调试和投运的有力措施。

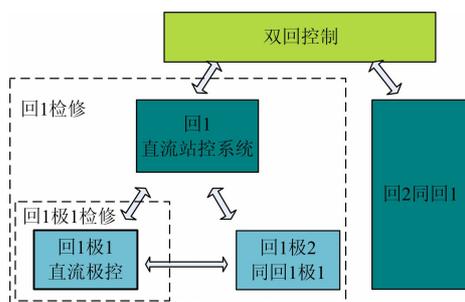


图 5 回检修/极检修示意图  
Fig. 5 Circuit/pole repair diagram

## 6 结论

依托±500 kV 溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程，研究分析了针对双回直流系统共起点、落点、共换流站的直流控制系统，包括该系统的分层结构、功能配置、控制策略等。尤其深入分析了双回直流控制层设置的必要性及其功能配置方式；提出了直流控制系统的硬件配置方案；提出

了双回直流协调控制的原则及控制策略；针对双回工程可靠性要求高和分期建设的特点，确定备用功能和回间隔离的控制系统优化措施。研究成果对于±500 kV 溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程的运行和检修维护具有指导意义，对于后续类似工程的实施具有参考借鉴作用。

### 参考文献

- [1] 南方电网超高压输电公司. ±500 kV 溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程可行性研究报告[R]. 2009. CSG Feasibility study report for Xiluodu-Guangdong DC transmission project of two 500 kV HVDC systems erected on the same tower[R]. 2009.
- [2] 张爱玲. 溪洛渡右岸电站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, 36(6): 72-76. ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 36(6): 72-76.
- [3] 南京南瑞继保电气有限公司. 溪洛渡工程 RTDS 仿真研究报告[R]. 2010. Nari Electric Co., Ltd. Xiluodu Project RTDS simulation study[R]. 2010.
- [4] 王春成. 共换流站±500 kV 同塔双回直流输电控制系统的分层结构[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 74-79. WANG Chuncheng. Hierarchical structure of control system for ±500 kV DC power transmission project adopting common converter station and double circuits on the same tower[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 74-79.
- [5] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 周君文, 刘涛, 李少华. 云广特高压工程控制系统功能分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 70-75. ZHOU Junwen, LIU Tao, LI Shaohua. Research on control functions in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 36(6): 70-75.
- [7] 赵军, 曹森, 刘涛, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启动策略研究及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 126-132. ZHAO Jun, CAO Sen, LIU Tao, et al. The research and optimization on DC line fault recovery sequence used in Guiguang HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 126-132.

收稿日期: 2014-10-10; 修回日期: 2014-12-15

作者简介:

胡蓉(1976-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为高压/特高压直流输电工程建设与技术管理。E-mail: hurong@chv.csg.cn

(编辑 张爱琴)