

10 000 MW 特高压直流工程受端分层接入交流 电网方式下直流控制系统研究

吴彦维, 李 晔, 陈大鹏, 李 乾, 周晓风

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 对于受端分层接入 1 000 kV 和 500 kV 交流电网的新型电网结构方式, 传统的特高压直流控制系统已经不再适用, 需要重新研究设计。在对这种新型电网结构方式的特点进行了分析后, 给出了与之相适应的直流控制系统整体结构和功能配置。受端同极的两个串联阀组接入不同的交流电网, 引起的最大难题是阀组间电压的不平衡, 为从控制功能上解决阀组间电压实时平衡的问题, 提出一种利用受端串联阀组中点电压测点的双阀组电压平衡控制策略。最后通过 RTDS 建模试验验证了控制策略的正确性, 为 2015 年电网公司即将实施的分层接入特高压直流工程提供了完整的控制保护解决方案。

关键词: 特高压直流; 分层接入方式; 控制系统; 稳定控制; 电压平衡控制

Research on control system for 10 000 MW UHVDC station B hierarchical connection to AC grid

WU Yanwei, LI Ye, CHEN Dapeng, LI Qian, ZHOU Xiaofeng
(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: For the new type of connection mode of ultra high-voltage alternate current (UHVDC) which is hierarchically connected to 1000 kV layer and 500 kV layer AC grid, the traditional UHVDC control system is no longer applicable. After analyzing the characteristics of this kind of connection mode, the control system for UHVDC hierarchical connection mode is studied. The biggest problem caused by series valve groups in the same pole being connected to different AC grid is valve groups voltage imbalance. In order to solve the problem of real-time valve voltage balancing from the control function, according to a DC voltage measuring point between the series valve groups, a new voltage of series valve balance control strategy is developed. Finally, a case of UHVDC transmission using RTDS validates the whole DC control system, provides a complete solution of control strategy for the UHVDC hierarchical connection project to be implemented in 2015.

Key words: ultra high voltage direct current (UHVDC); hierarchical connection mode; control system; stability control; voltage balance control

中图分类号: TM72

文章编号: 1674-3415(2015)18-0108-06

0 引言

随着±800 kV 哈密—河南、溪洛渡—浙江特高压直流工程的投运, 特高压直流输电建设进入快速发展阶段。高压直流输电技术需要受端交流电网提供足够的换相电压, 且在换相失败后的功率恢复过程中还需吸收大量的无功功率, 多馈入直流将给受端交流电网带来严重的安全稳定问题。文章[1]中提出采用特高压直流分层接入方式可以提高多馈入直流系统的电压支撑能力、引导电网潮流合理分布。

为解决多馈入直流系统电压稳定问题、促进交直流电网协调发展具有重要意义^[1]。

根据国家电网规划, 将新建±800 kV 新疆锡盟—江苏泰州(下文简称锡泰工程)、±1 100 kV 内蒙古呼伦贝尔—安徽皖南两回特高压直流输电工程, 其逆变站拟采用分层接入 1 000 kV 及 500 kV 交流电网的方式。这是国内首次建设这种接入方式的特高压直流工程, 所以目前我国对特高压直流分层接入方式的研究刚刚起步, 尤其是该方式对特高压直流控制系统的影响方面, 以传统的特高压控制保护

策略是无法适应这种分层接入方式, 根据国家电网 2015 年分层工程的规划, 对控制保护策略进行研究并提出切实可行的控制保护策略已经迫在眉睫。

逆变站分层接入方式是属于直流系统同一极的高、低端两个阀组分别接入 500 kV 及 1 000 kV 交流电网, 这种接入方式导致现有的特高压直流控制系统已经不再适用, 当前的特高压直流控制保护系统是将高、低压两个串联阀组当做一个整体统一控制, 电流、电压、熄弧角控制器布置在极控层, 阀组层相当于脉冲触发单元的一部分, 处于阀组层的换流变分接头控制虽然在高、低压阀组的组控中单独配置, 但也采用统一的控制策略, 控制的目标值也一致。逆变站采用分层接入方式后, 两个串联的阀组需要采用完全独立的控制, 需要将电流、电压、熄弧角控制器下放到阀组层, 才能满足两个不同交流电网的单独响应, 这就要求在串联的双阀组中间增加直流电压测点来保证双阀组的平衡运行, 当逆变侧切换到电流控制方式下还要增加逆变侧电压平衡控制功能, 来保证双阀组的电压平衡。阀组层的分接头控制也需要修改为独立控制, 从原来的统一控制双阀组压差修改为单独控制单阀组的压差。

针对上述问题, 本文以锡泰工程为应用背景, 对控制策略进行研究, 最后通过 RTDS 仿真分析, 验证了控制策略的可行性。

1 分层接入特高压直流输电系统特点

分层接入特高压直流输电系统主接线简图如图 1 所示, 和 ±800 kV 常规特高压直流输电工程相比较, 分层接入特高压直流输电系统控制有以下特点:

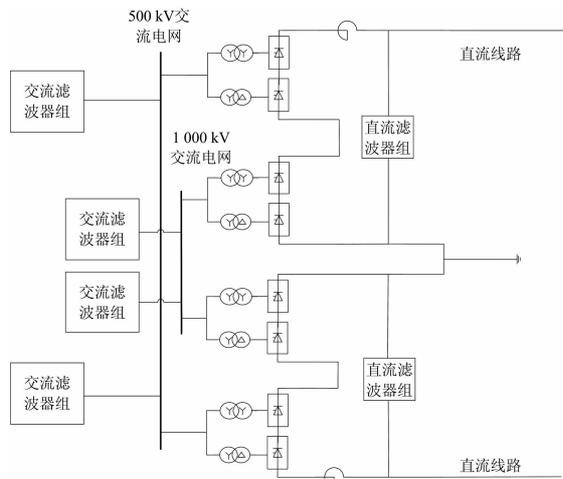


图 1 分层接入特高压直流输电系统主接线简图

Fig. 1 Main circuit of UHVDC system under hierarchical connection mode generators

(1) 功率正送时送端接入的交流系统电压仍为 500 kV, 控制保护系统的总体结构仍可采用常规 ±800 kV 直流工程中的方案。

(2) 每个阀组联接的换流变分接头独立控制。

(3) 每极的串联阀组中间增加了电压测量点, 极控配置有直流电压平衡控制功能。

(4) 受端两个交流系统母线分别配置相应的交流滤波器组, 并独立控制系统的交流电压和无功功率。

2 受端直流控制系统结构和功能配置

由于送端高压阀组和低压阀组在一个换流站内, 并且接入同一个 500 kV 交流系统中, 所以其控制系统可采用传统特高压直流输电方式按照双极、极、阀组进行功能配置。

对于受端分层接入两个交流电网的特高压直流换流站, 由于其高低端阀组也在同一个站内, 所以仍采用双极层控制、极层控制和阀组层控制的分层结构^[2-5]。因此按站配置一套双极层控制设备、按极配置两套极层控制设备和四套独立的阀组控制设备, 并且各层设备之间通过快速控制总线进行通信。其中双极层的功能配置在直流站控系统中, 极 1 和极 2 的极控系统单独配置, 根据阀组配置相应的阀组控制功能, 快速站间通讯通道配置在极层控制系统中。受端的总体结构图如图 2 所示。

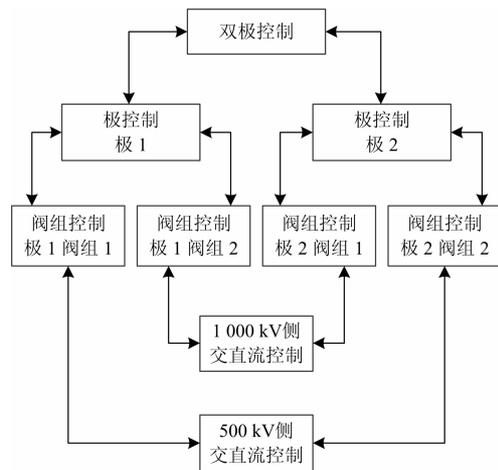


图 2 分层接入交流系统的受端控制系统总体结构

Fig. 2 Block structure of control system for station B under hierarchical connection mode

双极层控制: 采用相互独立的硬件处理单元来实现 1 000 kV 侧和 500 kV 侧交流电网的无功功率控制功能, 双极层的控制主要的功能有: 双极功率控制、稳定控制、功率方向控制、双极电流平衡控制、功率提升/回降等。

极层控制：与常规特高压直流相同，极层控制接收双极控制的指令，主要完成极直流电流、直流电压、熄弧角参考值的产生、交直流协调控制、极顺序操作等功能，并向本极阀组发出相关控制命令。与常规特高压直流不同的是，受端由于高低端阀组在测量回路上的极小误差都会对电流控制器产生很大影响，从而使两阀组电压不平衡，所以需要电压平衡控制功能产生一个电流参考叠加量来保持高低端阀组电压的平衡。

阀组层控制：阀组层控制主要完成分接头控制、阀组的启停、投退和解闭锁顺序操作，以及电流、电压和熄弧角的闭环控制、触发脉冲控制等功能。根据两个交流电网不同的系统参数和运行工况，与不同交流系统相连的阀组的分接头控制和触发脉冲控制相对独立。

3 稳定控制策略配置

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。稳定控制功能包括功率提升、功率回降、功率调制、频率限制。

功率提升、回降功能、功率调制功能，由于单极的双阀组是串联运行，电流保持一致，不能单独的去提升或者回降其中一个阀组的功率，必须同时调节处于两层电网上一个极的功率，所以在泰州站不需要为每层电网配置单独的安稳装置，泰州站安稳装置产生的功率调制量，通过站间通讯送到整流侧，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去控制直流系统的功率传输。当两侧站间通讯失败时，泰州站的稳定控制功能闭锁。

频率限制功能只有在整流站处于孤岛模式下才会投入，而且只在整流站投入，泰州站分层接入方式对频率限制功能并无影响。

泰州站分层接入 1 000 kV 和 500 kV 电网，还带来了功率转移问题，常规特高压直流具有三种功率传输方式，双极功率模式、单极功率模式、电流模式，三种功率传输模式的切换方式如图 3 所示。

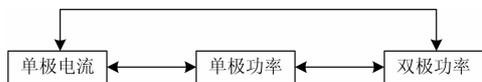


图 3 功率传输模式切换方式

Fig. 3 Power transmission mode switching method

常规特高压直流单阀组发生非正常闭锁情况下功率转移情况如表 1 所示。

锡泰工程的两个低端阀组接入 1 000 kV 电网，高端接入 500 kV，当某个阀组遇到保护性闭锁后，

表 1 特高压阀组非正常闭锁功率转移配置

Table 1 UHVDC valve abnormal blocking power transfer

	distribution			
	对极零阀组	对极电流模式	对极单极功率模式	对极双极功率模式
电流模式单阀组				√√
电流模式双阀组				√√
单极功率模式单阀组				√√
单极功率模式双阀组	√	√	√	√√或者√√√
双极功率模式单阀组				√√
双极功率模式双阀组	√	√	√	√√√

注：“√”表示本极功率转移，“√√”表示极间功率转移，“√√√”表示向剩余三阀组功率转移。

功率是否需要向不同电网的阀组转移，就需要根据泰州站的两个电网的潮流计算和热稳定等因素来决定。

4 控制系统适应分层接入方式的策略

无功功率控制配置于直流站控，受端两个交流系统通过联络变压器进行连接，通过 RTDS 的交流滤波器投切相互影响试验，发现两交流系统的无功投切关联性不大，两个交流系统之间的无功控制可以独立投切，使其与交流电网交换的无功功率保持在规定的范围内^[6-9]。

串联阀组电压平衡控制功能配置于极控如图 4 所示，由于分层接入的特高压换流站每极的两个阀组分属两个交流系统，受端高低端阀组电流控制器配置在阀组层，由于阀组控制的相对独立性，双阀组对同一直流电流的竞争控制及测量和控制系统的误差，必将导致两个串联阀组的不平衡运行，特别是在功率反送期间，泰州站作为整流侧运行，常态处于电流控制状态，故需要利用双阀组中间的直流电压测点对串联阀组的直流电压进行平衡；因此，加入了阀组电压平衡控制功能，可通过电压平衡控制产生一个电流参考叠加量来保持阀组电压平衡。在一些特殊的运行工况下，比如在线投入和退出一个阀组时需要暂时退出阀组电压平衡控制功能。

控制器的选择与切换配置在阀组控制，整流站常配置直流电流及电压控制器，逆变站除了电流、电压控制器还需额外配置了熄弧角控制器。功率正送方式下，正常工况下整流站控制直流电流，电压控制器用于限制直流过电压，由极控统一控制串联阀组的电流至电流设定值，由于双阀组的触发角一

致, 所以两阀组的独立电压差也是必然平衡; 泰州站把直流电压、电流及熄弧角控制器下放到阀组层, 以提高阀组控制和运行的相对独立性。组控通过电压控制器或熄弧角控制器控制直流电压, 电流控制器后备。同时, 在串联阀组的中点加装直流电压测点, 并以串联阀组的直流电压差值为控制手段平衡串联阀组的运行。功率反送时, 此时的分层接入端泰州站为整流站, 正常工况下整流站电流控制器起作用, 需要利用双阀组中间的直流电压测点对串联阀组的直流电压进行平衡; 逆变站双阀组都处于电压(或熄弧角)控制方式, 由极控统一控制直流电压至额定电压, 由于双阀组的触发角度一致, 所以两阀组的独立电压差也是必然平衡。

分接头控制配置在组控层, 分接头控制的目的是通过调节换流变抽头位置, 保持触发角、熄弧角、

直流电压或换流变二次电压在一定范围内。常规特高压的分接头控制同样配置于阀组控制, 每个阀组配置单独的分接头控制逻辑, 但是常规特高压要求每极串联的 2 个 12 脉动换流器的换流变压器分接头正常运行工况下, 高端换流器分接头和低端换流器分接头档位差距不能大于 1 档。当一个 12 脉动阀组换流变的分接头位置不一致时或当一极两换流器的档位相差两档时, 报警, 同时禁止分接头的自动移动。泰州站采用分层接入方式后, 由于同极的高低阀组连接的换流变参数(例如变比、漏抗、分接头调节步长等)完全不同, 分层接入两个不同系统参数和运行工况的交流电网, 从而造成高、低压阀组的空载直流电压、解锁后的触发角、熄弧角都有所不同, 因此需要取消上述的常规特高压的两阀组之间的档位限制功能, 达到双阀组分接头完全独立的控制。

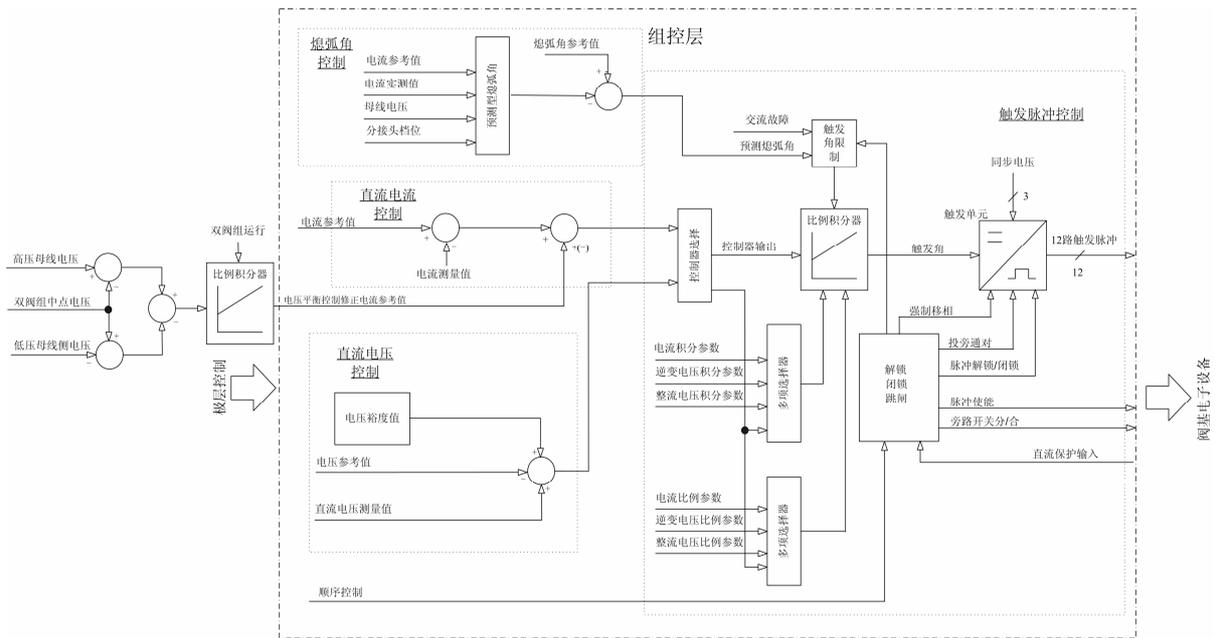


图 4 电压平衡控制原理图

Fig. 4 Principle diagram of voltage balance control

5 RTDS 仿真实验

为了对整个直流控制系统的有效性进行验证, 本文基于 RTDS 仿真工具, 以锡泰工程为研究对象搭建了特高压直流分层接入 1 000/500 kV 交流电网的完整直流控制系统, 并对上述控制策略进行了仿真实验^[10-14]。直流系统额定电压为 ± 800 kV, 额定电流 6.25 kA, 送端交流电网稳态电压 530 kV, 短路电流 30.1 kA。受端两交流系统稳态电压分别为 1 050 kV、520 kV, 短路电流分别为 25.6 kA、36.1 kA。

图 5 和图 6 为仿真结果, 控制系统按照上述直流控制结构和功能配置, 正送情况下, 系统解锁后直流电压和泰州站串联阀组中点电压很快达到额定值, 直流电流按照设定速率达到最大值 6.25 kA, 泰州站串联阀组中点电压, 在合理范围内波动, 平均值稳定在串联阀组压差的一半左右。图 6 为反送情况下分层接入的泰州站作为整流站的解锁波形, 由于锡泰工程规定反送情况下, 功率最大为正送时的 0.5 倍, 所以直流电流按照速率上升到 3.125 kA 后, 进入稳定运行状态, 泰州站串联阀组中点电压, 在

双阀组电压平衡功能的作用下，能够一直维持在合理范围内，证明了上述直流控制结构和功能配置的可行性。

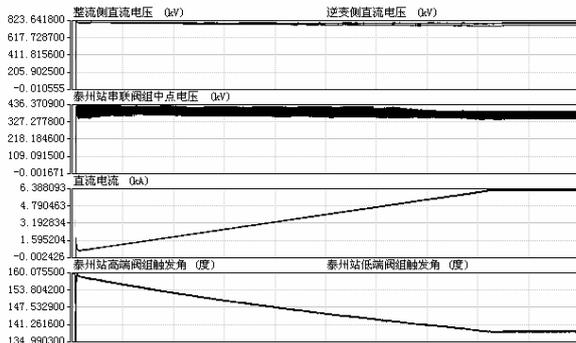


图 5 正送方式下直流系统单极启动及稳态运行波形

Fig. 5 Waveforms of DC system start-up and steady-state operation

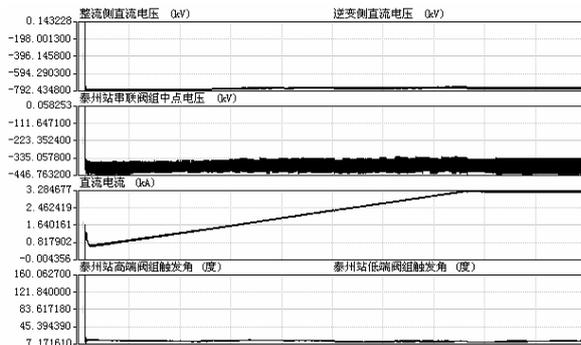


图 6 反送方式下直流系统单极启动及稳态运行波形

Fig. 6 Waveforms of DC system start-up and steady-state operation in reverse power direction

6 结论

本文以电网公司 2015 年规划的±800 kV 新疆锡盟—江苏泰州受端分层接入交流电网的特高直流输电工程为背景，针对受端换流站分层接入 1000/500 kV 交流电网的方式，提出了与之相适应的直流控制系统整体结构和功能配置方案，主要的研究成果如下：

1) 受端泰州站将电流、电压及熄弧角控制器下放到阀组层，利用泰州站在串联双阀组中间布置的直流电压测点，在极控中增加串联阀组平衡控制功能，平衡双阀组电压。

2) 通过 RTDS 的交流滤波器投切相互影响试验，发现两交流系统的无功投切关联性不大，两个交流系统之间的无功控制可以独立投切，两个电网的无功控制功能配置于直流站控，分别用两套独立的硬件来实现。

3) 由于两交流系统不同的电压特性，每个阀组

联接的换流变分接头应取消常规特高压的两阀组之间的档位限制功能，进行完全独立控制，分接头控制采用定阀组两端直流电压。

4) 受端站不需要为每层电网配置单独的安稳装置，受端站安稳装置产生的功率调制量，通过站间通讯送到整流侧，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去控制直流系统的功率传输。

通过 RTDS 的仿真验证，控制保护策略可以满足分层特高压直流输电设计规范的各种性能要求。为 2015 年即将实施的分层特高压工程做好了技术储备。

参考文献

[1] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.

[2] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.

[3] 胡铭, 田杰, 曹冬明, 等. 特高压直流输电控制系统结构配置分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 88-92.
HU Ming, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. Analysis of structure and configuration for UHVDC transmission control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 88-92.

[4] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 88-300.

[5] 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.
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, 39(9): 72-76.
- [6] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72-76.
ZHANG Wang, HAO Junfang, CAO Sen, et al. Design of reactive power control for HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 72-76.
- [7] 戴国安, 周君文, 王亚非. 特高压直流无功控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 48-51.
DAI Guoan, ZHOU Junwen, WANG Yafei. Strategy of reactive power control on UHVDC[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 48-51.
- [8] 黄金海, 冯雷, 李曼丽, 等. 糯扎渡送电广东特高压直流输电工程直流滤波器 C1 不平衡保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 46-51.
HUANG Jinhai, FENG Lei, LI Manli, et al. Study of DC filter C1 unbalance protection for Nuozhadu-Guangdong ultra high voltage direct current transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 46-51.
- [9] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二逻辑装置及配置策略在高岭背靠背扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 121-126.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. A new device with "selecting 2 from 3" logic and its configuration strategy applied in Gaoling back-to-back II project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 121-126.
- [10] 张民, 贺仁睦. 基于 PSCAD/EMTDC 的直流控制保护仿真系统仿真平台及其在直流工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 112-117.
ZHANG Min, HE Renmu. The HVDC control and protection simulation platform based on PSCAD/EMTDC and its application in HVDC projects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 112-117.
- [11] 刘永浩, 蔡泽祥. PSCAD/EMTDC 自定义建模及在直流线路保护仿真中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 119-124.
LIU Yonghao, CAI Zexiang. The user-defined model of PSCAD/EMTDC and its application in simulation of HVDC transmission line protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 119-124.
- [12] 孙慧平, 王西田. 高压直流输电动态向量模型的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 21-25.
SUN Huiping, WANG Xitian. Improved dynamic phasor model of HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 21-25.
- [13] 霍鹏飞, 王国功, 刘敏, 等. 向上±800 kV 特高压直流输电工程的直流保护闭锁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 139-144.
HUO Pengfei, WANG Guogong, LIU Min, et al. The DC protection block strategy in Xiangjiaba-Shanghai ±800 kV UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 139-144.
- [14] 李少华, 刘涛, 苏匀, 等. ±800 kV 特高压直流输电系统解锁/闭锁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 84-87.
LI Shaohua, LIU Tao, SU Yun, et al. Research on de-blocking/blocking operation in ±800 kV UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 84-87.

收稿日期: 2015-04-16

作者简介:

吴彦维(1980-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电控制保护系统软件设计; E-mail: wuyanweisgcc@163.com

李 晔(1989-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护系统软件设计; E-mail: liye_leaves@163.com

陈大鹏(1970-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统二次保护设计。E-mail: chendapengc@sohu.com

(编辑 张爱琴)