

高压直流输电系统双极功率调制异常分析

康建爽¹, 曹森¹, 张民², 吴彦伟¹, 宋臻吉³

(1. 许继直流输电系统部, 河南 许昌 461000; 2. 国家电网公司, 北京 100031; 3. 山东电力检修公司, 山东 济南 250000)

摘要: 依某直流系统功率调制异常为例, 结合现场相关事件记录和故障恢复前后时刻录波波形, 分析推断引起此次功率调节异常原因是整流侧接收到对站电流参考值出现异常。详细分析了总的功率参考值、总的电流参考值、直流电流参考值、直流电流测量值之间数值计算关系, 以及现场极控系统站间通信完成功能, 分析定位造成整流侧电流参考值异常原因是换流站站间通信通道存在异常。仿照现场极控系统实际站间通信配置结构, 设计仿真实验项目, 在实验室搭建的仿真平台上完成现场故障重现, 完成推论验证。最后, 总结分析造成直流系统功率调制异常相关环节并指出对应处理措施, 对今后功率调制相关故障快速处理具有实际指导意义。

关键词: 极控; 直流功率调制; 站间通信; 电流参考指令; 双极

Analysis of the bipolar power abnormal modulation for HVDC transmission system

KANG Jian-shuang¹, CAO Sen¹, ZHANG Min², WU Yan-wei¹, SONG Zhen-ji³

(1. HVDC Electric Power Transmission Department of XJ Group, Xuchang 461000, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Shandong Power Service Company, Jinan 250000, China)

Abstract: According to an HVDC system power modulation abnormal case, this paper analyzes the power abnormal modulation reason that the rectifier station receives the abnormal current reference from the other station based on the related events and recorded waveform before and after fault recovery. From the detailed analysis of the relationship among the total power reference, the total current reference, the DC current reference, the measured DC current value, and the role of the pole control DUST between the two stations, the inference which causing the abnormal current reference is the abnormal communication channel of the pole control between the two stations. The simulation projects are designed and reappeared in the simulation platform built in the laboratory according to the actual structure of the inter-station communication configuration. At last, it summarizes the related links which cause abnormal power modulation and gives corresponding treatments, which has guiding significance for similar power modulation fast processing in the HVDC system.

Key words: pole control; DC power modulation; DUST; DC current command; bipole

中图分类号: TM723; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0147-07

0 引言

2013年7月6日下午18点45分, 某直流系统主控站进行正常直流功率调节, 将负荷由当前4000 MW调节到2800 MW。当启动功率升降过程后, 运行人员观察发现, 后台双极均有对应“功率升降过程中事件”报出, 但实际双极直流功率并未发生变化。18:47, 将主控站转为对站, 由对站完成双极直流功率调制; 18:53, 当前主控站启动功率升降后, 极1功率开始下降, 极2功率仍保持不变; 19时05分17秒, 暂停直流功率升降过程, 重新整定功率参考值2800 MW、功率升降速率40

MW/min, 此时极1直流功率正常下降, 极2直流功率由调制前2010 MW跃变到1840 MW, 双极开始平衡运行, 极2功率恢复正常调制。

本文首先根据现场反馈信息及现场录波对上述异常工况进行原因分析并对相关控制参量进行理论推导计算, 根据分析结果在实验室仿真系统模拟重现上述异常工况。最后, 针对上述工况, 提出解决措施, 为今后类似故障快速处理具有实际指导意义^[1-6]。

1 双极功率调制异常原因分析

根据现场运行人员反馈, 极2功率跃变前双极运行工况如表1所示。

表 1 双极功率调制故障恢复前后系统运行工况
Table 1 Operating condition before and after bipolar power modular recovery

运行工况	整流侧		逆变侧	
	从站		主站	
	极 1	极 2	极 1	极 2
主控站				
控制模式	定双极功率控制	定双极功率控制	定双极功率控制	定双极功率控制
主导极位置	主导极	非主导极	主导极	非主导极
极控告警信息	通道 1 故障事件	通道 1 故障事件	极控无告警事件	极控无告警事件

图 1、图 2 所示为极 2 功率调制恢复正常前后整流侧极 1、极 2 现场录波。对极 1、极 2 现场录波综合分析发现，在双极直流功率调解过程中，极 1 直流电流测量值、直流电流参考值、总的电流参考

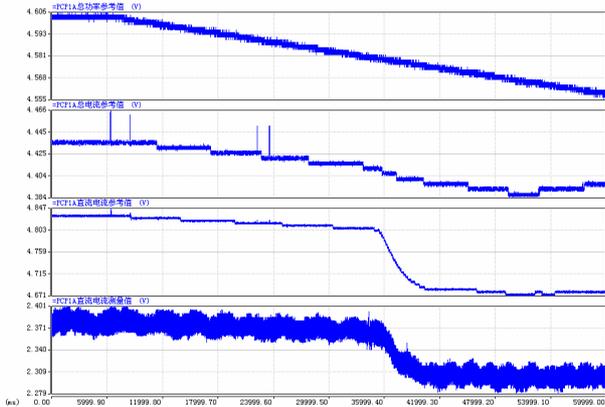


图 1 整流侧极 1 故障恢复前后录波波形
Fig. 1 Pole 1 of rectifier wave recording before and after fault recovery

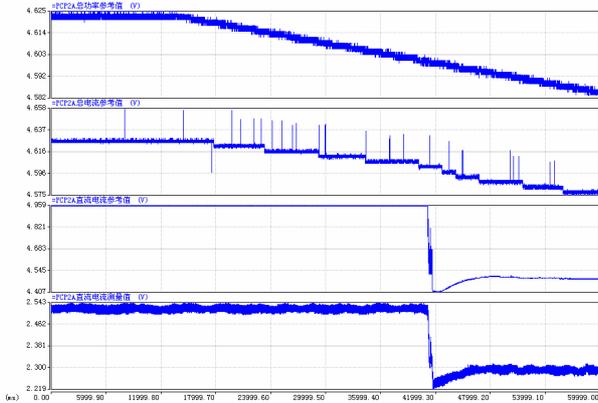


图 2 整流侧极 2 故障恢复前后录波波形
Fig. 2 Pole 2 of rectifier wave recording before and after fault recovery

值、总的功率参考值均按照相同趋势变化；而对应极 2 故障恢复前，直流电流测量值、直流电流参考值按照相同趋势变化，总的电流参考值与总的功率参考值按照相同的趋势变化；待极 2 功率调制恢复正常后，直流电流测量值、直流电流参考值、总的电流参考值、总的功率参考值按照相同的趋势变化。由此可得，实际直流电流受直流电流参考值直接影响，总的电流参考值受总的功率参考值直接影响，直流电流参考值除受总的电流参考值影响外，还受其他因素制约。

按照上述分析结论，对极控系统上述参考值之间逻辑关系进行分析。在双极功率控制模式下，极控系统接收到运行人员下发功率参考值及功率升降速率指令后，极控系统首先进行总的功率参考值计算^[7-10]。具体计算过程如图 3 所示。

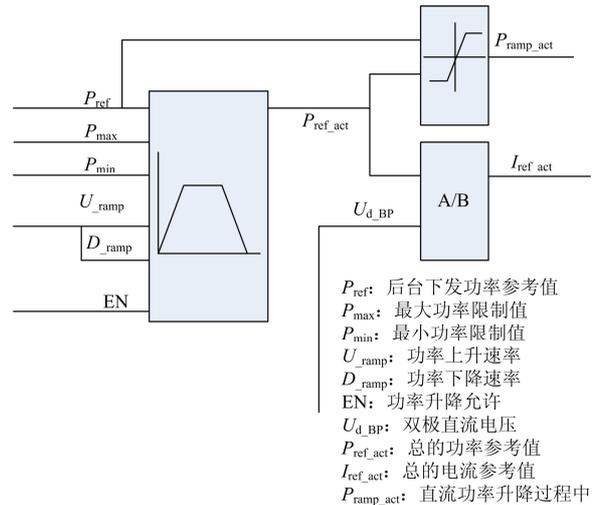


图 3 总的电流参考值计算
Fig. 3 Total current reference calculating

如图 3 所示，极控系统接收到后台运行人员下发的功率参考值及功率升降速率指令后，经过功率斜坡计算处理得到总的功率参考值。总的功率参考值除以当前双极实际直流电压，即得当前总的直流电流参考值。

直流电流参考值计算流程如图 4 所示。在站间通信正常情况下，整流侧电流参考值取自本站计算到总的电流参考值与逆变站通过站间通信传送过来的电流参考值二者取最大值进行阀组控制计算；逆变侧在不受限情况下，则直接采用整流侧通过站间通信通道传入的电流参考值进行阀组控制。因此，正常情况下，整流侧接收到对站电流参考值即为整流侧送出电流参考值，二者具有相同的变化趋势。

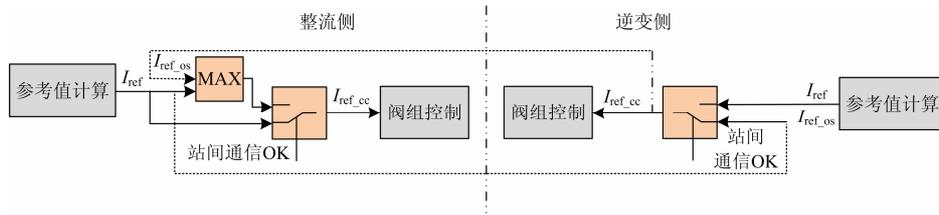


图4 直流电流参考值计算

Fig. 4 Current reference calculating

综合上述分析, 极2功率调制故障恢复前, 整流侧极2直流电流参考值保持在固定值, 并没有跟随本站电流总的电流参考值变化趋势变化。结合图4可知, 在站间通信正常情况下, 本站总的电流参考值与对站送入电流参考值理论上二者应保持相同变化趋势。因此可以推断, 整流侧接收到对站电流参考值出现异常。在故障恢复前, 极2进行功率调制过程中, 由于整流侧极2接收到对站电流参考值(I_{ref_os})始终保持在定值, 本站总的电流参考值与对站电流参考值进行最大比较过程中, 一直选取对站电流参考值用于阀组控制, 从而造成直流功率无法调节。

2 极控站间通信功能

极控系统站间通信主要用于完成两站极控系统间重要信号的传输。相对两端LAN网通信, 其显著特点是信息传输速度快。具体传输信号包括用于两端换流器启停控制的换流站解闭锁信号, 用于快速停运的紧急停运信号, 用于阀组触发控制直流电流参考值等事关直流系统安全稳定运行重要信号。为确保上述信号输送通道可靠性, 采用双通道冗余交叉配置来完成上述重要信号量传输。具体配置如图5所示。

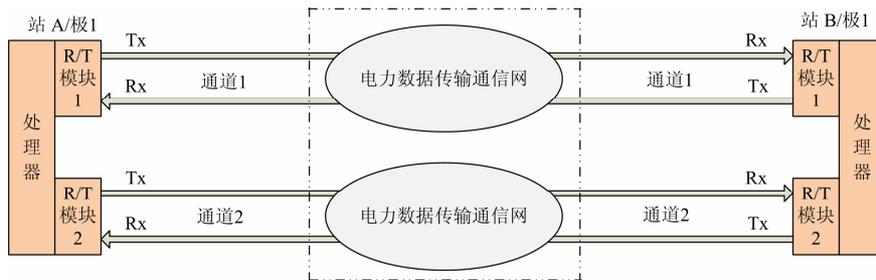


图5 极控站间通信配置

Fig. 5 Pole control DUST configuration between the two stations

如图5所示为一单极系统间站间通信配置, R/T模块1用于处理通道1数据传递, R/T模块2用于处理通道2数据传递; 通道1与通道2通过各自物理链路完成两站间数据传输。处理器分别接收通道1、通道2数据, 并自动完成有效通道数据选择。当其中一个通道故障后, 处理器能够通过自检功能, 自动选择另一通道完成两站极控间重要数据传输。

3 实验室模拟现场故障重现

根据上述分析, 可以推论由于站间通信通道异常, 极2整流侧无法接收到对站刷新后电流参考值, 一直稳定在故障前参考值, 造成极2直流功率无法正常调节。为验证上述分析, 在实验室仿真系统上

完成上述故障重现^[11-15]。整个仿真过程分为三个阶段: 首先模拟整流侧主控模式下, 双极功率正常调解过程, 以进行对比分析; 其次模拟整流侧主控模式下, 功率调解过程中, 整流侧接收不到对站电流参考值刷新后, 直流功率无法正常调制过程; 最后模拟逆变侧主控模式下, 极1直流功率调制正常, 极2功率调制由故障到恢复过程, 重现现场故障, 证明上述推断正确。

根据现场人员反馈, 当天站间通信通道1不可用。因此在具体实验项目设计过程中, 仅通过通信通道2完成站间数据传输, 以期达到完全模拟现场工况。

3.1 正常状态下, 整流站主控, 功率由4 000 MW → 3 700 MW, 功率升降速率100 MW/min

试验描述：模拟换流站两端站间通信通道 1 故障，通道 2 正常；整流站处于主控模式；极 1 极 2 均处于双极功率控制模式；功率输送容量 4 000 MW；系统稳态运行过程中，在 主控站重新设定功率参考值 3 700 MW，功率升降速率 100 MW/min，启动录波，观察双极功率升降过程。整流侧极 1、极 2 录波分别如图 6、图 7 所示。

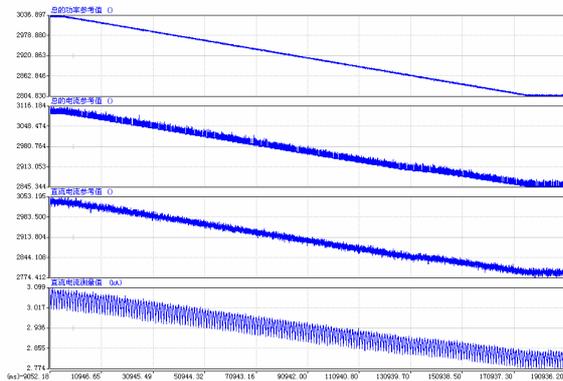


图 6 正常状态下整流侧极 1 录波

Fig. 6 Pole 1 of rectifier wave recording in normal state

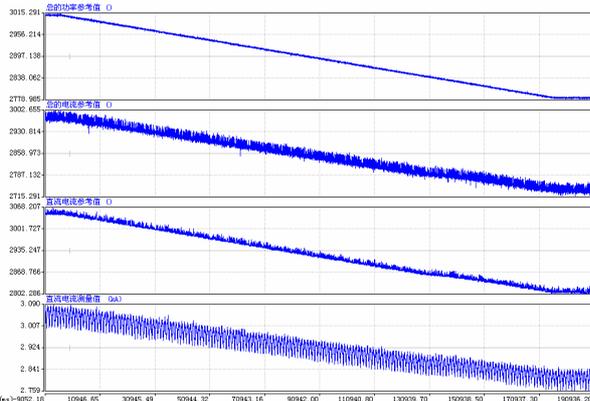


图 7 正常状态下整流侧极 2 录波

Fig. 7 Pole 2 of rectifier wave recording in normal state

对图 6、图 7 录波分析，当启动直流功率升降过程后，极 1、极 2 实际直流电流测量值均按照直流电流参考值变化趋势变化；直流电流参考值、总的电流参考值、总的功率参考值均按照相同趋势改变。因此证实，在站间通信通道处于单通道情况下，并不影响两站极控间数据交换，不影响极控系统对直流功率调制。

3.2 通信故障状态下，整流站主控，功率由 4 000 MW→3 700 MW，升降速率 100 MW/min

试验过程描述：模拟换流站两端通信异常，站间通信通道 1 故障，整流侧通过通道 2 接收不到对站刷新值情况下功率调制情况；整流侧为主控站，极 1、极 2 均为双极功率控制模式；功率输送容量

4 000 MW；系统运行过程中，在整流侧重新整定功率参考值 3 700 MW，功率升降速率 100 MW/min，启动录波，观察双极功率升降过程。整流侧极 1、极 2 录波波形分别如图 8、图 9 所示。

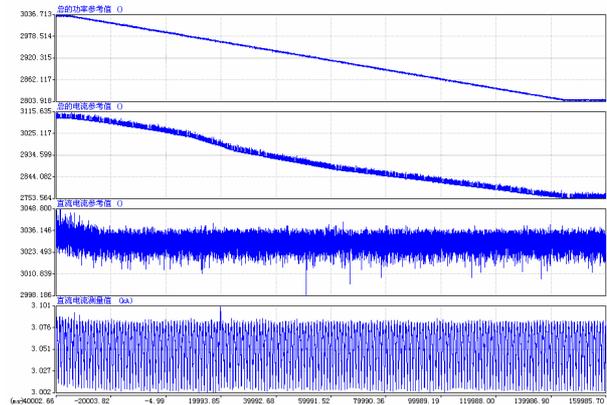


图 8 故障状态下整流侧极 1 录波

Fig. 8 Pole 1 of rectifier wave recording in abnormal state

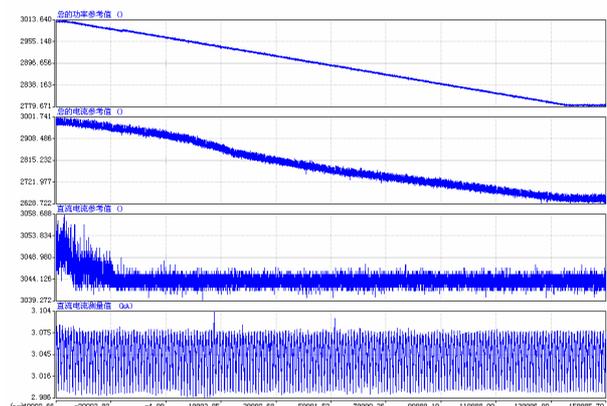


图 9 故障状态下整流侧极 2 录波

Fig. 9 Pole 2 of rectifier wave recording in abnormal state

对图 8、图 9 进行分析可知，在整流侧主控模式下，若受站间通信通道影响，整流侧接收不到逆变侧实时更新的电流参考值，在进行直流电流参考值计算过程中，虽然本站总的电流参考值随总的功率参考值变化而变化，但受对站电流参考值限制，送入阀组控制直流电流参考值不能跟随本站电流参考值变化，从而造成直流功率无法调节。该工况正好符合现场在整流侧进行直流功率调解过程中，直流功率无法下调现象。

3.3 故障恢复过程，逆变站主控，功率由 4 000 MW→2 800 MW，升降速率 200 MW/min

试验过程描述：模拟换流站两端通信异常，站间通信通道 1 故障，整流侧极 1 通过通道 2 接收到对站电流参考值正常，极 2 通过通道 2 接收到对站电流参考值由异常转为正常；极 1、极 2 均为双极

功率控制模式; 功率输送容量 4 000 MW; 系统稳定运行过程中, 在整流侧整定功率参考值 2 800 MW, 功率升降速率 200 MW/min, 启动录波, 观察双极功率升降过程。整流侧极 1、极 2 录波波形分别如图 10、图 11 所示。



图 10 故障恢复过程中整流侧极 1 录波
Fig. 10 Pole 1 of rectifier wave recording
before and after fault recovery



图 11 故障恢复过程中整流侧极 2 录波
Fig. 11 Pole 2 of rectifier wave recording
before and after fault recovery

如图 10 所示, 极 1 直流电流测量值、直流电流参考值、总的电流参考值、总的功率参考值均按照相同的变化趋势变化, 直流功率随电流参考值变化平稳变化。对于极 2 功率调制过程, 如图 11 所示, 故障前时刻, 由于整流侧极 2 没有接收对站电流参考值刷新值, 受对站电流限制值限制, 直流电流参考值并没有跟随本站总的电流参考值变化而变化, 极 2 直流功率无法正常调解。待故障恢复后, 整流侧极 2 能够实时接收对站电流参考值, 极 2 直流功率调制恢复正常。故障恢复瞬间, 如图 11 所示, 由于总的电流参考值一直随总功率参考值变化而变化, 故障恢复时刻前直流电流参考值一直受通信通

道影响, 直流电流参考值稳定在固定值, 待上述故障恢复后, 本站接收到对站刷新后直流电流参考值, 而此时电流参考值相对上一时刻电流参考值发生跃变, 从而造成送入阀组控制的直流电流参考值相对上一时刻发生阶跃变化, 造成实际直流电流发生阶跃变化。

4 分析结论

通过上述故障原因分析以及故障仿真验证, 可以得出以下结论: 在整流侧下发功率参考值、功率升降速率并启动功率升降后, 双极功率均不能正确调节。这是由于受当时站间通信通道影响, 整流侧极 1、极 2 均没有接收到对站刷新后电流参考值, 使得在计算电流参考值进行功率调节过程中, 受对站电流参考值影响, 送入阀组控制的直流电流参考值一直保持在固定值, 从而造成双极直流功率均无法调节。

当逆变站转为主控站进行功率调解过程中, 极 1 能够正常进行功率调节, 极 2 经过一段时刻后恢复直流功率调节。无论主控站在整流侧还是逆变侧, 直流功率的具体调解过程均是在整流侧完成的。而极 1 能够正常进行直流功率调解, 极 2 经过一段时刻后才恢复直流功率正常调解是由于该段时刻整流侧极 1 已经能够正常通过通道 2 实时接收对站电流参考值, 而极 2 通过通道 2 恢复正常接收对站电流参考值时刻相对极 1 较晚。功率调解异常与主控站位于整流侧还是逆变侧无关。

5 防范措施

经过上述分析过程可以得出, 在系统层双极功率控制模式下, 在进行直流功率调制过程中, 以下几个方面可能造成双极直流功率无法调节:

极控系统是否接收到后台下发直流功率调制指令;

整流侧通过站间通信通道接收到对站电流参考值是否正常。

对于第一种情况, 可以通过观察后台是否有对应“功率升降过程中”事件报出来验证。当有该事件报出时, 表示极控系统接收到后台下发的功率参考值及功率升降速率指令, 并启动了总的功率参考值计算功能。若没有对应事件报出, 表示极控系统没有接收到该指令, 需检查后台与极控之间通信是否正常。

对于第二种情况, 当明确极控系统接收到后台下发功率参考指令后, 需通过录波观察直流电流参考值是否发生变化。正常情况下, 直流电流参考值、总的

电流参考值、总的功率参考值均按照相同的趋势变化。当检测到直流电流参考值不随总的电流参考值变化趋势变化时,表示极控系统没有接收到对站刷新后电流参考值,需要检查站间通信通道是否完好。

此外,对于急需进行直流功率调制但在系统层无法实现时,可将换流站运行模式由系统层运行模式切换为站层运行模式,在整流侧进行直流功率调制。在站层控制模式下,整流侧在进行功率调制过程中,不再受对站电流参考值限制。但缺点是在功率升降过程中,直流功率升降速率不宜设置过高,避免换流站两端失去电流裕度控制。

6 结语

本文依某换流站在进行功率调制过程中出现异常为分析背景,详细分析了在系统层双极功率控制模式下,直流电流参考值计算处理逻辑,并对极控系统站间通讯配置进行了详细分析。结合上述理论分析及现场实际录波,指出造成此次直流功率不可调原因。根据推论结果,研究设计仿真实验项目,在搭建的实验室仿真平台完成上述故障重现,验证分析结论。最后,总结影响功率调制相关环节并给出对应的解决措施,对换流站类似故障处理具有实际指导意义。

参考文献

- [1] 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 Ren-mu. 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.
- [2] 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 Yong-hao, CAI Ze-xiang. 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.
- [3] 周俊, 郭剑波. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jian-bo. Digital/analog dynamic simulation for ± 500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [4] 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 Hui-ping, WANG Xi-tian. Improved dynamic phasor model of HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 21-25.
- [5] 王峰, 徐政. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WAN Feng, XU Zheng. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [7] 王瑶. 特高压直流输电控制与保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 54-64.
WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 54-64.
- [8] 张欣, 饶国辉. 特高压直流输电培训仿真系统的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 76-78.
ZHANG Xin, RAO Guo-hui. Design and implementation of UHVDC training simulation system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 76-78.
- [9] 吴华坚, 王渝红. 基于综合性能指标的交直流混合系统直流调制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 68-73.
WU Hua-jian, WANG Yu-hong. Study on DC modulation for AC/DC hybrid transmission system based on comprehension performance index[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 68-73.
- [10] 周孝法, 陈陈. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多馈入直流输电系统优化协调直流调制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 193-201.
ZHOU Xiao-fa, CHEN Chen. Optimal coordinated HVDC modulation based on adaptive chaos particle swarm optimization algorithm in multi-infeed HVDC

- transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 193-201.
- [11] 田庆. 天广直流双侧频差调制异常分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 94-98.
- TIAN Qing. Studies on the abnormality of bilateral frequency difference modulation in Tian-Guang HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 94-98.
- [12] 徐梅梅, 李兴源. 德宝直流调制对四川电网阻尼特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 141-146.
- XU Mei-mei, LI Xing-yuan. Impact on the damping characteristics of Sichuan power grid by Debao DC modulation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 141-146.
- [13] 谢开贵, 吴韬. 基于二分法的高压直流输电系统可靠性最优分解[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 149-154.
- XIE Kai-gui, WU Tao. Reliability optimal distribution for HVDC systems using bisection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 149-154.
- [14] GRUND C E, BAHNNAN M P. Dynamic performance characteristics of North American HVDC system for transient and dynamic stability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(7): 3356-3363.
- [15] ELLITHY K A. Effect of load models on AC/DC system stability and modulation control design[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1989, 4(2): 411-417.

收稿日期: 2013-07-31; 修回日期: 2013-10-25

作者简介:

康建爽(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事直流输电二次系统控制保护系统仿真研究; E-mail: kangjianshuang@xjgc.com

曹森(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事直流输电二次系统控制保护系统仿真研究;

张民(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事直流输电系统二次系统设计、运行与维护等相关方面的研究工作。