

# 特高压直流输电控制保护特性对内过电压的影响

朱艺颖, 蒋卫平, 吴雅妮

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Influence of UHVDC Control and Protection Characteristics on Inner Overvoltage

ZHU Yi-ying, JIANG Wei-ping, WU Ya-ni

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Based on the concrete parameters of the  $\pm 800$  kV UHVDC transmission system from Xiangjiaba to Nanhui, the detailed calculation and analysis on the influence of HVDC control and protection characteristics on internal overvoltage are conducted by use of electromagnetic transient calculation software EMTP-RV. The feasible suggestions for the study on the inner overvoltage of HVDC transmission system are proposed. Research results show that HVDC control and protection characteristic evidently impacts the inner Overvoltage. The main characteristic, which should be simulated as closed as possible to that of the real projects, need considered fully.

**KEY WORDS:** inner overvoltage; HVDC transmission system; control and protection

**摘要:** 基于金沙江一期向家坝—南汇 $\pm 800$  kV 直流输电工程的具体参数, 利用电磁暂态计算软件 EMTP-RV, 针对直流输电控制保护动作特性对内过电压的影响进行了详细的仿真计算和分析总结, 并对高压直流输电内过电压的研究方法提出了可行性建议。研究表明, 高压直流输电系统控制保护动作时序对内过电压影响较大, 在研究高压直流输电系统的内过电压时, 应尽可能模拟实际直流输电系统控制保护的时序, 以确保仿真结果更加接近实际系统。

**关键词:** 内过电压; 直流输电; 控制保护

## 0 引言

电力系统内过电压是指由于电力系统故障和/或开关操作引起电网中电磁能量的转化, 从而造成瞬时或持续时间较长的高于电网额定允许电压并对电气装置造成潜在威胁的电压升高。电力系统内过电压是发展高压、超高压及特高压电网所必须研究的重要课题, 它既影响变压器、断路器、输电线路等电力设备绝缘强度的合理设计, 还直接关系到电力系统能否安全可靠运行<sup>[1-3]</sup>。

内过电压分为操作过电压和暂时过电压 2 大类。故障或操作时瞬间发生的过渡过程过电压称为操作过电压, 其持续时间一般在几十毫秒之内。操作过电压结束后出现持续时间大于 0.1ms 至数秒甚至持续时间更长的过电压称为暂时过电压, 暂时过电压又分为工频过电压和谐振过电压<sup>[3-5]</sup>。高压直流输电的一个显著特点是可以通过快速调节两端换流器的触发角, 控制直流系统的电压和电流, 并将故障对设备的影响降到最低, 即直流输电系统的性能极大地依赖于控制系统<sup>[6-8]</sup>。由于直流输电控制保护系统在故障或操作发生后几毫秒内即能动作, 研究直流系统的内过电压时, 应考虑控制保护的时序特性。

引起直流输电系统操作过电压的操作或故障一般包括投入和重新投入交流滤波器或并联电容器以及清除交直流侧对地故障、换流器内部短路故障等<sup>[9-10]</sup>。

本文结合 $\pm 800$  kV 向家坝—上海直流输电工程, 仿真计算模型中采用实际工程的具体参数, 采用电磁暂态计算软件 EMTP-RV<sup>[11]</sup>, 针对几个典型故障形式下的过电压, 模拟了不同的控制保护特性, 并对仿真计算结果进行了对比分析。分析结果对高压直流输电的过电压绝缘配合研究具有参考价值。

## 1 整流侧移相速度对过电压计算结果的影响

直流系统发生故障时, 通常情况下整流侧控制保护系统首先将触发角从当前运行角度移相至 $164^\circ$ 左右。故障发生时刻到发令移相的时间由保护动作指令决定, 通常从几毫秒到几十毫秒。从发令移相至移相到 $164^\circ$ 的时间与控制保护动作特性相关, 以三峡—广东直流输电工程为例, 该段时间约为 $20\text{ ms}$ <sup>[12-13]</sup>。大量计算结果显示, 对于整流侧站内故障如阀顶对地、阀短路、阀顶对中性母线、换

流变二次引线单相接地等故障而言,移相速度对过电压计算结果没有明显影响,但对直流线路以及逆变侧故障而言,影响较大。本文以靠近逆变侧直流线路接地故障为例加以说明。直流线路发生接地故障时,整流侧再启动保护动作将触发角移相,以限制直流侧短路电流,促进短路电弧熄灭,一定时间后直流系统再启动。为说明整流侧移相速度对内过电压计算结果的影响,本文分别对采用 2 种移相速度下的内过电压情况进行了仿真计算。计算模型为向家坝—南汇特高压直流输电工程正极金属回线额定负荷运行<sup>[14]</sup>,整流侧在接地故障发生后 15 ms 发出移相命令。表 1 为移相命令发出后 1 ms 内移相到 164°时的直流系统内过电压数值,表 2 为从发出移相命令至移相到 164°的时间为 20 ms 时直流系统的内过电压数值。

直流额定功率逆变侧直流线路出口接地故障时逆变侧直流极线电压波形如图 1 和图 2 所示,图 1 为整流侧快速移相时的波形,图 2 为整流侧慢速移相时的波形。

由表 1、2 可以看出,接地故障发生后整流侧快速移相时,逆变侧直流极线电压瞬时最大值为 1 392 kV,而在接地故障发生后整流侧慢速移相时,逆变侧直流极线电压瞬时最大值为 1 229 kV,2 个计算结果相差 172 kV。其他各点的电压最大值也均有不同。由此可以得出,在进行直流系统内过电压研究仿真计算时,应充分考虑整流侧的移相速度,

表 1 直流额定功率下逆变侧直流线路出口接地故障、整流侧快速移相时过电压计算结果

**Tab. 1 The simulation results for staged DC line to ground fault near the inverter station on rated DC power under the condition of rectifier rapidly retarding**

测量位置	整流侧电压/kV	逆变侧电压/kV	
直流极线	1 260	1 392	
直流阀顶	1 150	1 149	
中性母线	411	103	
中性母线(阀侧)	407	220	
测点	12 脉动桥间	656	649
	上组 6 脉动桥间	922	905
	下组 6 脉动桥间	437	471
对地	500kV 交流母线	517	426
	换流变阀侧高压端 Y 绕组端子	1 149	1 175
	换流变阀侧高压端 D 绕组端子	922	905
	换流变阀侧低压端 Y 绕组端子	657	741
	换流变阀侧低压端 D 绕组端子	493	471
元件两端	平波电抗器(极线)	416	595
	平波电抗器(中性母线)	258	305
	换流阀	379	380

表 2 直流额定功率下逆变侧直流线路出口接地故障、整流侧慢速移相时过电压计算结果

**Tab. 2 The simulation results for staged DC line to ground fault near the inverter station on rated DC power under the condition of rectifier slowly retarding**

测量位置	整流侧电压/kV	逆变侧电压/kV	
直流极线	1 299	1 220	
直流阀顶	1 269	1 097	
中性母线	379	103	
中性母线(阀侧)	419	214	
测点	12 脉动桥间	747	606
	上组 6 脉动桥间	1 003	972
	下组 6 脉动桥间	519	480
对地	500kV 交流母线	550	458
	换流变阀侧高压端 Y 绕组端子	1 268	1 202
	换流变阀侧高压端 D 绕组端子	1 007	956
	换流变阀侧低压端 Y 绕组端子	747	707
	换流变阀侧低压端 D 绕组端子	615	529
元件两端	平波电抗器(极线)	235	498
	平波电抗器(中性母线)	258	305
	换流阀	366	366

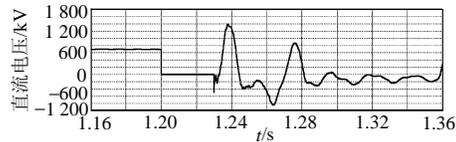


图 1 逆变侧直流线路出口发生接地故障时整流侧快速移相时逆变侧直流电压波形

Fig. 1 The DC voltage waveform on inverter side when staged DC line to ground fault near the inverter occurs under the condition of rectifier rapidly retarding

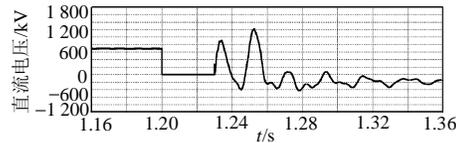


图 2 逆变侧直流线路出口发生接地故障时整流侧慢速移相时逆变侧直流电压波形

Fig. 2 The DC voltage waveform on inverter side when staged DC line to ground fault near the inverter occurs under the condition of rectifier slowly retarding

使其尽可能与实际工程相一致。

## 2 低压限流环节对过电压计算结果的影响

低压限流(voltage dependent current order limit, VDCOL)环节的任务是直流电压降低时对直流电流指令进行限制,其主要作用是系统扰动后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的恢复和避免连续换相失败<sup>[13]</sup>。大量计算结果显示,对于逆变侧故障如阀顶对地、阀短路、阀顶对中性母线、换流变二次引线单相接地等故障而言,过电压仿真计算中是否考虑 VDCOL 环节对过电压计算结果有较大影响。本文以逆变侧发生换流

变二次侧引线单相接地短路故障为例加以说明。逆变站换流变二次侧引线单相接地短路故障导致逆变侧中性母线电流大于直流线路电流, 通常情况下逆变侧阀差动保护动作闭锁直流。为说明 VDCOL 环节对内过电压计算的影响, 分别对考虑 VDCOL 环节和不考虑 VDCOL 环节 2 种控制方式下逆变侧发生换流变二次侧引线单相接地故障的内过电压情况进行了仿真计算。计算模型为向家坝—南汇特高压直流输电工程正极金属回线额定负荷运行, 逆变侧在故障发生后 16ms 投旁通对、19ms 后移相, 整流侧在故障发生后 36ms 移相, 逆变侧直流线路电压低于 -55 kV 时逆变侧闭锁, 116ms 后整流侧闭锁。表 3 和表 4 分别为考虑与不考虑 VDCOL 环节逆变侧发生换流变二次侧引线单相接地短路故障时直流系统的内过电压数值。

直流额定功率逆变站换流变二次侧引线发生单相接地短路故障时整流侧直流极线电压波形如图 3 和图 4 所示, 图 3 为 VDCOL 控制环节起作用时的波形, 图 4 为 VDCOL 控制环节不起作用时的波形。

由表 3、4 可以看出, 逆变站换流变二次侧引线发生单相接地短路故障时, 在 VDCOL 控制环节起作用的情况下, 整流侧直流极线电压瞬时最大值为 1 000 kV, 而 VDCOL 控制环节不起作用的情况下, 整流侧直流极线电压瞬时最大值为 1 306 kV, 2 个计算结果相差 306 kV。其他各点的电压最大值也均有不同。由此可以得出, 在进行直流系统内过电

表 3 考虑 VDCOL 环节逆变侧发生换流变二次侧引线单相接地短路故障时的过电压计算结果

Tab. 3 The simulation results for the single phase to ground fault on the secondary side of the converter transformer at inverter side with VDCOL

测量位置	整流侧电压/kV	逆变侧电压/kV
直流极线	1 000	696
直流阀顶	827	720
中性母线	380	92
中性母线(阀侧)	358	223
12 脉动桥间	434	370
上组 6 脉动桥间	662	554
下组 6 脉动桥间	370	217
500kV 交流母线	514	435
换流变阀侧高压端 Y 绕组端子	910	760
换流变阀侧高压端 D 绕组端子	626	567
换流变阀侧低压端 Y 绕组端子	659	427
换流变阀侧低压端 D 绕组端子	492	376
平波电抗器(极线)	423	689
平波电抗器(中性母线)	423	270
换流阀	406	374

表 4 不考虑 VDCOL 环节逆变侧发生换流变二次侧引线单相接地短路故障时的过电压计算结果

Tab. 4 The simulation results for the single phase to ground fault on the secondary side of the converter transformer at inverter side without VDCOL

测量位置	整流侧电压/kV	逆变侧电压/kV
直流极线	1 306	697
直流阀顶	1 303	721
中性母线	389	93
中性母线(阀侧)	418	223
12 脉动桥间	692	348
上组 6 脉动桥间	1 061	555
下组 6 脉动桥间	483	217
500kV 交流母线	522	451
换流变阀侧高压端 Y 绕组端子	1 303	761
换流变阀侧高压端 D 绕组端子	1 005	555
换流变阀侧低压端 Y 绕组端子	698	427
换流变阀侧低压端 D 绕组端子	541	376
平波电抗器(极线)	289	689
平波电抗器(中性母线)	289	270
换流阀	398	414

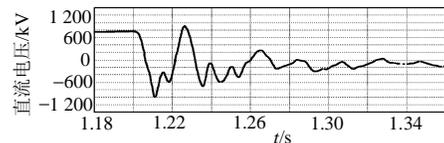


图 3 逆变站换流变二次侧引线单相接地时整流侧直流极线电压波形(考虑 VDCOL 环节)

Fig. 3 The DC voltage waveform at rectifier side when the single phase to ground fault occurs on the secondary side of the inverter converter transformer with VDCOL

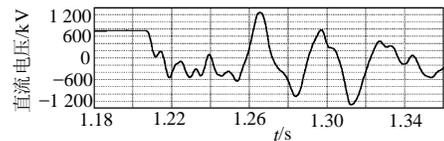


图 4 逆变站换流变二次侧引线单相接地时整流侧直流极线电压波形(不考虑 VDCOL 环节)

Fig. 4 The DC voltage waveform at rectifier side when the single phase to ground fault occurs on the secondary side of the inverter converter transformer without VDCOL

压研究仿真计算时, 应模拟实际直流工程中 VDCOL 控制环节的动作特性, 使其尽可能与实际工程相一致。

### 3 逆变侧投旁通对时的过电压计算结果

大多数情况下逆变侧接到闭锁命令时需立即投入旁通对, 形成换流器直流侧端子间短接的低阻电路。它为换流器直流电流提供一条不流经换流变压器的通路。旁通对的主要作用是使换流变压器网侧断路器快速断开, 以利于带有故障的部分尽快与交流电源脱离, 且避免交流断路器跳闸引起过电压<sup>[15-16]</sup>。

大量仿真计算表明, 逆变侧闭锁时是否考虑投

入旁通对对过电压的计算结果有较大影响。此外，对于某些故障类型，旁通对的投入时间和退出时间也对过电压的计算结果有一定影响。通常情况下逆变侧在接到闭锁命令后立即投入旁通对，在直流极线电压低于-55 kV(正极，负极高于 55 kV)时取消投旁通对命令。本文通过模拟逆变侧紧急停运来说明投旁通对对过电压计算结果的影响。计算模型为向家坝—南汇特高压直流输电工程双极额定负荷运行，逆变侧投旁通对后直流线路电压低于±55 kV 时逆变侧闭锁，20 ms 后整流侧闭锁。表 5 为逆变侧投入旁通对紧急停运时直流系统内过电压的计算结果，表 6 为逆变侧不投入旁通对紧急停运时直流系统内过电压的计算结果。

表 5 逆变侧投入旁通对紧急停运时直流系统内过电压计算结果

Tab. 5 The simulation results for ESOF with bypass pairs at inverter side

测量位置	整流侧电压/kV	逆变侧电压/kV
直流极线	805	748
直流阀顶	850	768
中性母线	0.6	0.4
中性母线(阀侧)	344	219
测点 12 脉动桥间	514	401
对上组 6 脉动桥间	770	595
对下组 6 脉动桥间	466	229
地 500kV 交流母线	570	505
换流变阀侧高压端 Y 绕组端子	906	819
换流变阀侧高压端 D 绕组端子	704	603
换流变阀侧低压端 Y 绕组端子	597	447
换流变阀侧低压端 D 绕组端子	565	439
元件 平波电抗器(极线)	346	538
两端 平波电抗器(中性母线)	344	219
换流阀(各阀桥中最大值)	339	282

表 6 逆变侧不投入旁通对紧急停运时直流系统内过电压计算结果

Tab. 6 The simulation results for ESOF without bypass pairs at inverter side

测量位置	整流侧电压/kV	逆变侧电压/kV
直流极线	1 248	1 406
直流阀顶	1 248	1 392
中性母线	1.2	0.8
中性母线(阀侧)	398	229
测点 12 脉动桥间	590	648
对上组 6 脉动桥间	825	1 017
对下组 6 脉动桥间	463	431
地 500 kV 交流母线	594	593
换流变阀侧高压端 Y 绕组端子	1 169	1 336
换流变阀侧高压端 D 绕组端子	855	957
换流变阀侧低压端 Y 绕组端子	577	624
换流变阀侧低压端 D 绕组端子	467	431
元件 平波电抗器(极线)	408	495
两端 平波电抗器(中性母线)	398	229
换流阀(各阀桥中最大值)	365	327

由表 5、6 可以看出，逆变侧投入旁通对紧急停运时，整流侧直流极线和直流阀顶电压瞬时最大值为 805 kV，而逆变侧不投入旁通对紧急停运时，直流极线电压瞬时最大值为 1 248 kV，2 个计算结果相差 443 kV。其他各点的电压最大值也均有不同。由此可以得出，在进行直流系统内过电压仿真计算时，应充分考虑旁通对的动作过程，使其尽可能与实际工程相一致。

直流额定功率逆变侧紧急停运时整流侧直流极线电压波形如图 5、6 所示，图 5 为紧急停运投入旁通对时的波形，图 6 为紧急停运不投入旁通对时的波形。

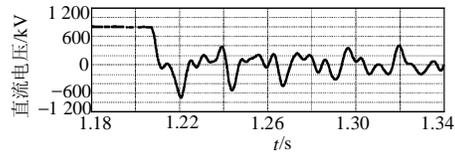


图 5 逆变侧紧急停运投旁通对整流侧直流电压波形  
Fig. 5 The DC voltage waveform at rectifier side when ESOF with bypass pairs at inverter side

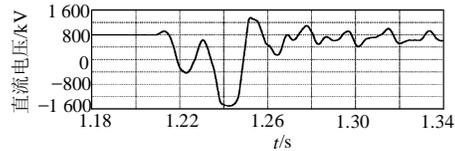


图 6 逆变侧紧急停运不投旁通对整流侧直流电压波形  
Fig. 6 The DC voltage waveform at rectifier side when ESOF without bypass pairs at inverter side

#### 4 结论

由于高压直流输电系统控制保护动作时序对内过电压影响较大，在研究高压直流输电系统的内过电压时，应尽可能模拟实际直流输电系统控制保护的时序，以确保仿真结果更接近实际系统，更好地为直流工程建设和运行提供技术支持和服务。

#### 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] Dommel H W, 李永庄等译. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [3] 吴韦韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [4] 解广润. 过电压及保护[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [5] 张纬铤. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [7] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

(下转第 20 页 continued on page 20)