

± 500 kV换流站直流侧操作过电压影响因素分析

基于PSCAD/EMTDC仿真平台，依托三常±500 kV直流输电工程建立直流输电仿真模型，针对引起直流场操作过电压的接地极线开路、高端换流变压器阀侧单相接地短路故障、金属回线开路、全压起动以及逆变阀闭锁而旁通对未解锁五种典型操作过电压故障的运行方式，接地电阻，故障地点和故障相位等故障条件，对换流站直流侧操作过电压的影响进行了仿真分析。仿真分析结果与研究结论对高压直流输电工程绝缘配合、故障分析以及过电压仿真计算故障条件选择具有一定的指导意义。

周志成¹ 李 婷² 谢天喜¹ 贺恒鑫² 何俊佳²/1.江苏省电力公司电力科学研究院 2.华中科技大学电气与电子工程学院



周志成/高级工程师

关键词/Keywords
换流站·
直流侧操作过电压·
电磁暂态仿真·
故障条件·

我国能源与负荷中心呈逆向分布，远距离、大容量输电成为我国电力发展的必由之路^[1-2]。高压直流输电具有线路造价低、电能损耗小、稳定性高以及调节快速的优点，因此在我国得到了广泛的应用和发展，我国已经成为世界上直流输电工程最多的国家。

为了确保投运的工程能够安全可靠地运行，在直流输电工程的设计阶段需要进行过电压计算、故障分析等工作，以确定设备的绝缘性能水平以及评估控制保护策略的优劣^[3-4]。与交流输电相比，高压直流输电的故障种类更为丰富和复杂，并且考虑到运行方式、故障时的电压相位、故障地点以及接地电阻等对故障特性的影响，在设计阶段需要进行大量的仿真计算工作。详细研究直流输电典型故障特征的影响因素，为故障计算时故障条件的设置提供指导，具有工程实用价值。

本文基于PSCAD/EMTDC仿真平

台建立了±500 kV高压直流输电工程仿真模型，针对引起换流站直流侧操作过电压的几种典型操作过电压故障，分析了各故障的过电压产生机理，研究了故障条件对过电压幅值的影响，为故障分析、过电压仿真计算故障条件的设置提供了理论指导。

研究条件与仿真模型

1. 工程参数

本文依托三常±500 kV直流输电工程进行研究计算。三常直流输电工程西起湖北宜昌龙泉换流站，东至江苏常州的政平换流站，工程由两个换流站及其接地极、直流输电线路组成，输送距离为860 km，主要工程参数如表1所示。

表1 三常直流工程基本参数

		龙泉站	政平站
交流电压/kV	额定值	500	500
	最大值	550	540
直流电压/kV	额定值	500	500
	最大值	515	515
直流电流/kA	额定值	3 000	
	最大值	300	
平抗/mH		290	270
触发角 (°)		15	
关断角 (°)		17	

工程采用双调谐直流滤波器，龙泉站配置三大组交流滤波器，其中包括三小组HP11/13滤波器，每组容量140 Mvar；三小组HP24/36滤波器，每组容量140 Mvar；两小组HP3滤波器，每组容量118 Mvar。政平站配置两大组交流滤波器，包括五小组HP12/24滤波器，每组容量220 Mvar；

四小组并联电容器, 每组容量190 Mvar。

2. 仿真模型

目前在电磁暂态仿真领域内已开发出了许多软件, 现在比较流行的主要有PSCAD/EMTDC、ATP/EMTP和EMTP_RV等, 其中的EMTDC软件是一款专门针对直流输电系统开发的电磁暂态仿真软件, 具有丰富和准确的元件模型以及快速分析数据的功能^[5-6], 相比于其他仿真软件, 增加了直流输电设备的模型。本文以PSCAD/EMTDC软件作为仿真平台建立的模型示意图如图1所示, 换流站的避雷器配置情况如图2所示。搭建的换流站内主要设备以及输电线路的配备和参数与实际工程保持一致, 交流系统采用戴维南等效电路, 等效电路不影响直流系统动态性能分析^[7]。

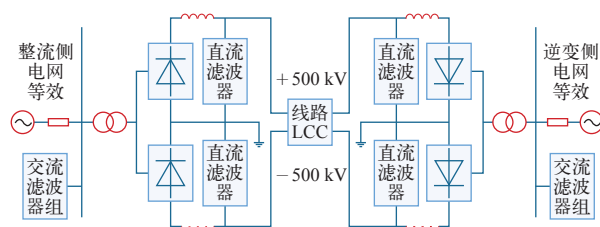


图1 直流输电仿真模型原理

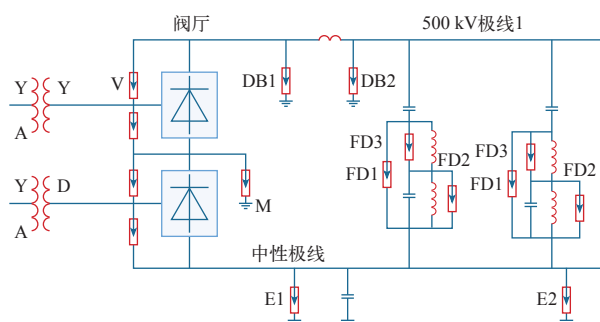


图2 换流站避雷器配置图

仿真计算内容及结果分析

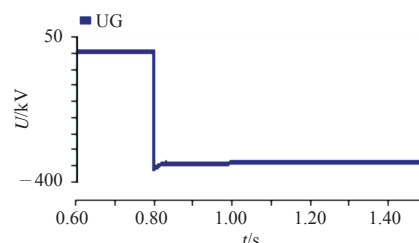
在运行的过程中, 直流输电系统换流站内会由于交流侧操作过电压传递、换流站内接地故障以及换流站直流线路操作过电压传递等原因出现操作过电压^[8-10]。本部分基于直流系统的额定运行方式, 存在以下五种典型过电压故障: ①接地极线开路故障; ②高端换流变压器阀侧单相接地短路故障; ③金属回线开路故障; ④全压起动故障;

⑤逆变站阀闭锁而旁通对未解锁。依托搭建的三常直流输电工程进行仿真计算, 分析过电压产生的机理及故障条件对过电压的影响。

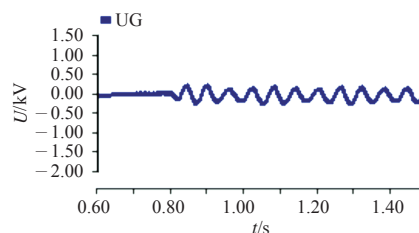
1. 接地极线开路故障

直流输电系统的接地极线往往采用双回架空线路, 当直流系统以大地回线方式运行时, 单回接地极线路的开路故障只改变电流回路的电阻, 系统仍能够运行, 不会出现过电压^[11-12]。在同时发生两根接地极线路导线断线的情况下, 中性母线产生严重的过电压。

对单极大地回线与双极运行方式下接地极不同位置处的断线故障进行仿真计算, 两种运行方式下中性母线过电压的典型波形如图3所示, 即在双极运行的方式下中性母线上不会产生过电压。事实上, 当双回运行时, 接地极线中的直流电流较小, 发生断线故障后线路中的电流仍能通过正负两极构成回路, 不会失去返回线, 因而影响不大, 不会产生过电压。单极大地回线方式下, 接地极线断开后, 电流只能通过E型避雷器入地, 将会造成中性母线上的过电压。



(a) 单极大地回线方式



(b) 双极对称运行

图3 接地极线开路中性母线电压典型波形

单极大地回线方式下中性母线上的过电压情况如表2所示。表中, (1/4, 1/2) 表示一回线路在距离入口1/4处故障, 另一回在距离入口1/2处发生故障。根据仿真结果, 接地极线开路故障导致的过电压与故障产生的位置无关。

表2 单极大地回线方式下阀底及中性母线过电压

整流侧 故障位置	整流侧阀底/ 中性母线 U/kV	逆变侧 故障位置	逆变侧阀底/ 中性母线 U/kV
入口处	362/363	入口处	110/111
距离入口1/4	362/363	距离入口1/4	110/111
距离入口1/2	362/363	距离入口1/2	110/111
距离入口3/4	362/363	距离入口3/4	110/111
(1/4, 1/2)	362/363	(1/4, 1/2)	110/111
(1/4, 3/4)	362.5/363.5	(1/4, 3/4)	110/111

2. 高端换流变阀侧单相接地短路故障

换流站最高电位的换流变压器在运行过程中承受较高的电位，其阀侧套管闪络时将会引发换流变压器阀侧单相接地短路故障，故障后极线与中性线电流差动保护动作移相闭锁换流器。故障发生后，平抗上由于阀端电压的跌落产生过电压，同时零电位发生变化，使故障相电压通过故障点、接地极及导通阀构成回路，在中性母线上产生过电压。非故障相换流阀承受电压为线路电压与交流线电压之差，当非故障相换流阀阳极的线电压处于负半周时，可能产生过电压。

由于换流变压器阀侧的三相电路具有完全的等效性，因此仅对高端换流变压器阀侧的A相接地短路故障进行分析。高端换流变压器阀侧单相接地短路故障的过电压特性可能受到运行方式、接地电阻与故障相位等故障条件的影响，由于该类故障一般为金属性接地，因此仿真时考虑接地电阻在 $10\ \Omega$ 之内变化，而故障相位在 360° 内均匀变化。

各运行方式下接地电阻与故障相位对过电压影响的计算结果如表3~表5所示。表中， r 为故障发生在整流侧； i 为故障发生在逆变侧； U_v 、 U_c 和 U_i 分别为阀端、中性母线以及平抗两端的过电压。

由于平抗两端的过电压由故障后线路电压来不及放电所导致，其值为线路电压与导通阀的交流侧电压之差，因此只与故障时相对应阀是否导通有关，即与故障相位有关，这与仿真结果一致。

由于运行方式影响故障电流的流通回路，因此系统运行的方式影响过电压计算结果。接地电阻对计算结果稍有影响，故障相位对过电压计算的结果影响较大。从根本上来说，运行方式与故

障时刻影响故障时阀的导通与关断，从而影响到电压幅值。因此在进行该类故障的过电压仿真计算时，应该计及各种运行方式，考虑在一个工频周期内变化的故障相位，计算出最大的过电压。

表3 双极运行方式下的过电压

接地 电阻 / Ω	整流侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	逆变侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	故障 相位 ($^\circ$)	整流侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	逆变侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV
0	402/280/486	319/99/463	0	448/276/253	330/99/464
2	397/273/486	320/98/462	60	402/280/486	319/99/463
4	394/264/486	319/98/462	120	402/281/489	289/99/463
6	395/258/486	320/98/461	180	414/289/489	298/97/257
8	401/251/485	319/98/460	240	378/198/246	316/97/295
10	407/244/485	318/97/460	300	364/212/254	337/96/278

表4 单极大地回线方式下的过电压

接地 电阻 / Ω	整流侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	逆变侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	故障 相位 ($^\circ$)	整流侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	逆变侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV
0	431/313/490	307/100/466	0	442/259/255	332/100/465
2	425/307/489	304/100/463	60	431/313/490	307/100/406
4	418/300/489	302/100/463	120	372/313/490	309/100/464
6	411/294/488	299/100/462	180	362/199/491	295/98/240
8	412/288/488	297/100/461	240	375/199/247	314/98/285
10	418/282/487	294/100/461	300	400/277/248	336/95/304

表5 单极金属回线方式下的过电压

接地 电阻 / Ω	整流侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	逆变侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	故障 相位 ($^\circ$)	整流侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV	逆变侧故障 $U_v/U_c/U_i$ /kV
0	413/296/491	314/100/464	0	446/250/256	332/100/465
2	448/289/491	311/100/463	60	413/296/491	314/100/464
4	447/282/490	308/100/463	120	410/296/491	298/100/464
6	448/276/490	306/100/462	180	399/217/493	296/98/297
8	449/270/489	304/100/462	240	389/198/249	305/98/302
10	449/263/488	304/99/461	300	367/260/249	336/98/305

3. 金属回线开路

当直流系统以单极金属回线运行时，整流侧接地极不投入，仅有逆变侧接地极投入运行，因此当金属回线断线或者转换开关误跳时，电流失去返回线，电流经过中性母线与金属回线上的避雷器入地，将会造成中性母线与金属回线的过电压，另外极线上也会感应出过电压。仿真时设定

金属回线的开路故障发生在不同的位置，仿真结果如表6所示。

表6 金属回线开路故障故障位置对过电压的影响
(单位: kV)

故障地点	中性母线 (r/i) U	金属回线 (r/i) U	线路入口 (r/i) U
整流侧入口	350/95	352/98	556/464
距整流侧入口1/10	357/94	358/98	657/464
距整流侧入口1/8	362/96	360/98	805/464
距整流侧入口1/6	359/95	359/97	806/464
距整流侧入口1/3	358/95	360/98	806/464
距整流侧入口1/2	360/98	364/100	789/639
距整流侧入口2/3	364/99	365/100	778/542
距整流侧入口5/6	364/99	364/100	773/521
距整流侧入口7/8	364/99	364/100	757/509
逆变侧线路入口	363/93	364/94	752/464

根据仿真结果，金属回线开路故障位置的变化对中性母线与金属回线过电压的影响较小，整体上来说，故障位置到整流站的距离增大，过电压的数值稍有上升。对线路的过电压影响较大，体现为随着故障位置与整流站的距离增大，线路入口的过电压呈现出先增后减的趋势，故障位置在中性点附近时出现最大的过电压。因此，在进行金属回线开路过电压的仿真时，将故障地点设置在金属回线中性点附近，可以计算出该种故障下过电压的最大值。

4. 全压启动

直流系统正常启动时，整流站通过两站站控系统经通信系统命令逆变站先解锁，然后整流站解锁，直流电压和电流上升率受极控的调节系统控制能够平缓地上升。

如果直流系统的站控和极控系统同时发生故障，并给出错误的解锁信号，则整流站以最小 α 角解锁，且调节器失去调节功能，而逆变站处于闭锁状态，则在直流线路以及极设备上将产生过电压。由于线路瞬间充电电压较高，而闭锁的逆变站相当于线路末端开路，末端呈现全反射，于是在线路上和直流母线设备产生很高的过电压。设定系统以最小触发角 5° 启动，逆变侧闭锁，分析系统在单极大地回线，单极金属回线，双极启动，

其中一极正常启动、一极全压启动，双极全压启动，一极正常运行时全压启动另一极五种故障工况，直流侧的各处过电压如表7所示。

表7 运行方式对全压启动过电压的影响
(单位: kV)

运行方式	阀顶 (r/i) U	线路出口 (r/i) U	中性母线 (r/i) U	平抗两端 (r/i) U	阀底 (r/i) U
单极大地	694/772	736/788	52/92	402/53	51/92
单极金属	723/763	730/802	201/94	402/63	201/94
双极启动， 单极全压启动	694/774	736/788	52/92	402/53	51/92
双极全压启动	709/786	796/814	30/94	402/74	30/94
一极正常， 另一极全压启动	684/785	733/810	52/93	433/71	52/93

全压启动故障下，中性母线与平抗两端虽然会产生过电压，但相对来说幅值不大，不是影响该处绝缘选择的主要因素。对于线路，直流输电线路通常较长，全压启动时线路上波的折反射会在线路上产生严重的过电压，最大的过电压出现在输电线路的末端，整流端由于线路上的损耗衰减，过电压幅值比逆变侧小。仿真结果表明，运行方式对该类过电压的计算存在影响，相比之下，由于双极的互相影响，当双极控制同时失误并使双极均全压启动时，会在线路出口处产生最严重的过电压。其次是单极金属回线和一极正常、另一极全压启动的工况，由于这两种工况都体现为另一回无电流或者正导通直流电流线路的影响，因此计算出来的过电压值不大。由于双极控制同时失误的概率较小，可以不考虑，而选取单极金属回线下全压启动或者一极正常、另一极全压启动的工况进行仿真计算。

5. 逆变侧闭锁而旁通对未解锁

当系统正常运行时，由于运行人员的操作失误或者是控制保护系统出现失误，可能导致逆变站在还未投旁通对时即闭锁了换流阀，十二脉动桥中原来导通的4个阀继续导通，产生换相失败，从而交流电压传递到直流侧，造成逆变站直流侧过电压。当逆变站电流先于整流站过零时，整流侧继续向线路注入能量，逆变侧所有阀关断相当于开路，电压波在逆变侧全反射，在直流线路和直流设备上

产生严重的过电压。产生该类过电压的根本原因是换相失败以及线路上波的折反射，故障产生的时刻对换相失败与开路状态的产生不起决定性作用，因此该类故障产生的过电压与故障发生的时刻无关，即与故障时刻导通的阀位置无关。

当系统以不同方式运行时，双回线之间的相互影响以及电流回路参数变化影响波的折反射，因此运行方式的变化将会对过电压产生影响。针对单极大地回线、单极金属回线以及双极运行时单极阀闭锁而旁通对未解锁进行仿真分析，双极同时丢失发生该类故障的概率很小，因此本文不考虑，仿真结果如表8所示。由表8可知，由于线路上存在波的折反射，因此最严重的过电压出现在线路出口处，双极运行方式下过电压的幅值最大。当双回运行时，故障极的直流电压与直流电流大幅波动，在健全极的线路上感应出过电压，该电压反过来又影响故障极线路，因此在双回运行情况下的过电压最为严重。

表8 运行方式对逆变站闭锁旁通对未过电压的影响

(单位: kV)

运行方式	阀顶 (r/i) U	阀底 (r/i) U	中性母线 (r/i) U	线路出口 (r/i) U	平抗两端 (r/i) U
单极大地	597/607	52/48	50/48	597/707	272/209
单极金属	631/613	387/36	387/35	613/630	313/176
双极运行	665/762	72/70	72/68	817/777	403/283

结束语

基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建了三常±500 kV直流输电工程的仿真模型，对几种引起直流侧操作过电压的典型故障进行了分析计算，得到以下结论：

1) 接地极双回线路均开路，电流失去返回线时，中性母线上产生过电压，过电压的幅值与开路故障发生的位置无关。

2) 高端换流变压器阀侧单相接地短路故障下的过电压受接地电阻的影响较小，主要受到运行方式与故障时刻的影响，仿真时在考虑系统的运行方式的情况下，应在一个工频周期内均匀分布，设置故障发生时刻，以计算过电压的最大值。

3) 金属回线开路故障下的过电压与开路的位置有关，当故障位置在金属回线中性点附近时，将产生最严重的过电压。

4) 全压启动时，由于双回线路的互相影响，最严重的过电压出现在单极金属回线下全压启动或者单极正常运行时全压启动另一极的工况下。

5) 逆变侧阀闭锁而旁通对未解锁故障中的最大过电压工况为双极运行。

参考文献

- [1] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
- [2] 彭毅晖. 高压直流输电的发展与展望[J]. 湖南电力, 2007, 1(27): 52-55.
- [3] 周沛洪, 等. ±800 kV直流系统过电压保护和绝缘配合研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 125-132.
- [4] 张赞, 等. ±660 kV直流输电工程过电压与绝缘配合[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 54-57.
- [5] 潘学萍. 电力系统数字仿真研究综述[J]. 江苏电机工程, 2005, 24(1): 80-84.
- [6] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 1-12.
- [7] 杨光, 朱韬析, 等. 直流输电系统接地极线路故障研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 45-49.
- [8] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 1-12.
- [10] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [11] 成敬周, 徐政. 直流输电共用接地极线方式的保护特性[J]. 电力系统自动化, 2012, 35(14): 77-82.
- [12] 谢海滨, 屠幼萍, 等. ±500 kV直流输电系统双极运行时的内部过电压研究[J]. 宁夏电力, 2009(1): 1-5.

(收稿日期: 2014-10-31) EA