

± 800 kV 特高压换流站直流侧操作过电压的仿真与研究

司马文霞, 庞 锴, 杨 庆

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 根据国内外现有的资料, 利用 PSCAD/EMTDC 软件, 建立了一个较完整的换流站操作过电压计算模型, 研究了有关操作和故障情况下 ±800 kV 换流站直流侧可能出现的操作过电压。计算换流站主要设备典型故障工况时, 对交流母线、直流线路、中性母线等设备可能产生的最大操作过电压水平进行了分析, 还针对避雷器配置方法以及有避雷器和无避雷器时的过电压计算进行了研究。仿真计算结果表明, 其有利于进一步分析特高压直流输电系统中因交直流系统故障引起的操作过电压大小以及相应绝缘水平的确定。

关键词: 特高压直流; 换流站; 操作过电压

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0126-03

Simulation and Investigation on Switching Overvoltage at DC Side of UHVDC Converter Station with Capacity of ±800 kV

SIMA Wen-xia, PANG Kai, YANG Qing

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Insulation coordination of converter station is a main problem in the UHVDC design, which will influence safe operation of the whole DC system. According to the published literature, an EMTDC model of switching overvoltage was built via the PSCAD/EMTDC software. Then, the overvoltage at DC side of ±800 kV converter station under various operation and fault conditions was calculated, which included the maximum overvoltage on AC buses, DC lines, neutral buses, and so on. The applications of arresters in UHVDC and the over-voltage calculation of with or without surge arrester were also discussed. Simulation results show that it would be useful for further analysis of ultra-high voltage direct current transmission system for AC and DC operating system failures caused by over-voltage and the corresponding size of the level of insulation.

Key words: UHVDC; converter station; switching overvoltage

0 引言

在对特高压直流输电的电压等级进行研究和论证时, 考虑到我国对直流输电技术的研发水平和直流设备的研制能力, 认为确定一个特高压直流电压水平是必要的, 并把 ±800 kV 确定为我国特高压直流输电的标称电压^[1-3]。特高压直流换流站作为直流输电系统的核心, 由于站内存在着许多电感和电容组件^[2], 当系统发生故障或进行操作时, 系统参数和工作条件的改变会造成内部过电压, 其中又以操作过电压最为常见。这些都严重地威胁到换流站内设备的安全性以及整个直流输电系统乃至大电网运行的稳定性。因此, 做好换流站的过电压研究是有必要的。

为了确定换流站直流侧故障和操作情况下直流侧主要设备如阀、桥和中性母线等可能承受的最大

应力, 笔者采用仿真软件 PSCAD/EMTDC, 对有无避雷器时单极 ±800 kV 金属回线和双极 ±800 kV 运行方式下, 换流站直流侧几种典型工况所产生的操作过电压进行仿真计算, 其结果有助于进一步分析特高压直流输电系统中因交直流系统故障引起的操作过电压大小以及相应绝缘水平的确定。

1 计算模型

1.1 电源和换流变压器的参数模拟

交流两侧的电网等效模型采用中性点通过电感电阻接地的三相电源, 电源内阻用阻容回路和电感回路并联等效。整流侧、逆变侧连接方式见图 1, 通过 2 台二次侧接成星形和三角形的三相双绕组变压器向整流阀和逆变阀供电。

1.2 换流阀的参数模拟

鉴于仿真时的操作过电压没有考虑阀本身的

收稿日期: 2007-08-11; 修回日期: 2007-12-28

作者简介: 司马文霞(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 从事高电压输变电技术研究。

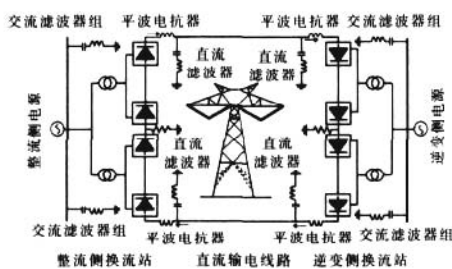


图1 EMTDC 仿真模型

故障情况,换流阀采用图2所示的EMTDC软件高压直流输电(HVDC)及柔性交流输电(FACTS)模型库中的换流阀模型,阀模型中的缓冲回路参数也是根据EMTDC仿真步长 $50\ \mu\text{s}$ 选取的($\sqrt{RC} = \sqrt{5\ 000 \times 0.05} = 50\ \mu\text{s}$)。

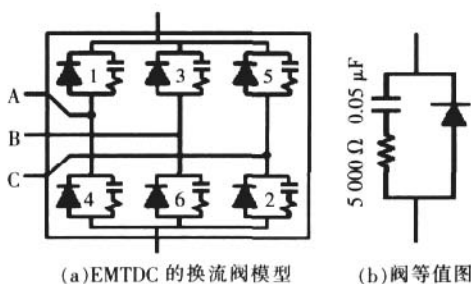


图2 阀的等效模型

1.3 输电线路

直流输电线路全长1 438 km,导线布置见图3。

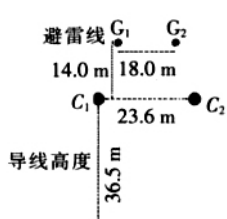


图3 输电线路杆塔图

考虑到笔者计算的是换流站内直流侧的操作过电压的大小,根据文[3]所述,模型中直流线路使用一根导线来代替分裂电极导线进行计算,直流电阻为10.87。

1.4 系统参数及主要元件

根据文[3]:计算时采用交流系统标称稳态电压;整流侧和逆变侧额定AC电压分别为525、230 kV,短路比 $SCR=2.9$,为弱交流系统; $\pm 800\ \text{kV}$ 双极运行,直流正向全压运行额定值为双极5 000 MW,单极2 500 MW。

1.4.1 500 kV 换流变压器参数

500 kV 换流变压器参数见表1。

表1 500 kV 换流变压器参数

换流站	额定电压/kV	额定功率/MV·A	短路阻抗/(%)
整流侧	525/170.1	752.0	18.0
逆变侧	230/209.2	592.0	18.0

1.4.2 交流滤波器参数

交流侧的滤波器采用满足最小无功补偿分组配置,参考贵广直流工程滤波器和电容器组参数并按主电容容量作了修改^[4,5],整流站交流滤波器和电

容器组容量分为5大组,每组容量600 Mvar;逆变站全部交流滤波器分成4个大组,每个大组容量760 Mvar,合计3 040 Mvar,见表2。

表2 $\pm 800\ \text{kV}$ 换流站的无功配置

无功配置	整流侧	逆变侧
无功大组数/组	5	4
无功大组容量/Mvar	600	760
无功小组数/组	20	16
无功小组容量/Mvar	150	190
11/13 双调谐滤波器/组	8	4
24 单调谐滤波器/组	-	4
3/24/36 三调谐滤波器/组	6	-
电容器/组	6	8

$\pm 800\ \text{kV}$ 特高压换流站的平波电抗器安装在直流极线线和中性母线上,模型中平波电抗器电感值为400 mH。另外,控制系统模型采用整流侧定电流控制和最小触发角限制、逆变侧定电流和定关断角控制的基本控制方式,对换流阀的触发脉冲采用了与实际情况相一致的等间隔触发模拟。

2 过电压分析计算

换流站内出现操作过电压的原因通常有:①交流侧操作过电压通过换流变压器传递到换流器上;②换流变压器阀侧出口至换流阀之间对地短路,由于直流滤波电容器的放电和交流电流的涌入,在换流器和直流中性母线上产生操作过电压;③换流站交流接地故障清除时产生的操作冲击通过换流变压器传导作用到换流阀上等。

笔者计算如下几种工况:①交流侧故障产生的操作冲击通过换流变传到阀侧引起的操作过电压;②金属回线运行方式下,直流极线平波电抗器线路侧对地短路时在中性母线上的最大操作冲击;③金属回线运行方式下,整流站全压启动,逆变阀丢失脉冲闭锁时在直流极线上出现的最大操作冲击。

2.1 无避雷器时的过电压计算

整流器正常运行时触发角在 15° 左右,故先对 $\alpha=15^\circ$ 的情况进行分析,此时整流器的理想空载直流电压为 $U_d=2 \times (3\sqrt{2}/\pi) E \cos \alpha = 815.8\ \text{kV}$ 。

2.1.1 阀和换流变阀侧过电压

相间的操作过电压能从交流系统以全幅值传递到换流变阀侧,它通过变压器(按变比)出现在不导通的阀上。交流侧发生不对称接地故障时,在整流侧产生的操作冲击较严重。典型的工况为:交流母线A相接地,上、下十二脉波桥阀1、阀2导通,换流变A、C两相同时反极性进波,此时交流母线电压下降约30%,见图4(a)。十二脉波上半桥阀5将承受最大的操作波冲击电压,过电压约2倍左右,波形见图4(b)。

2.1.2 中性母线过电压

在金属回线运行方式下,由于金属回线阻抗大,且整流站不接地,引起整流站中性母线对地电位升

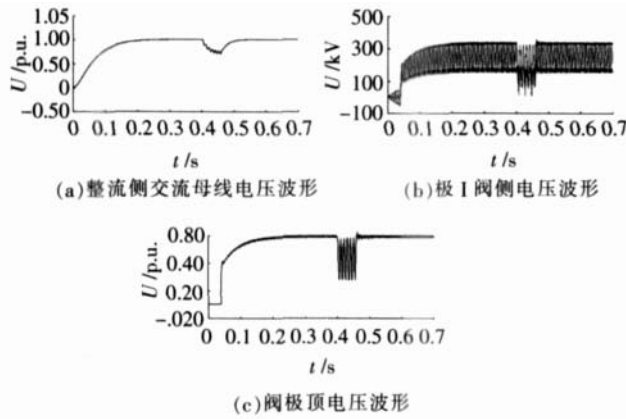


图4 交流侧A相接地的仿真结果

高，所以金属回线运行方式下的故障工况是决定中性母线操作冲击水平的关键。

对于中性母线，研究了两个关键工况：①工况1。系统在稳态运行情况下，换流变阀侧 U_{BC} 线电压达到峰值时B相对地短路；②工况2。系统在稳态运行情况下，直流线路达到电压纹波峰值时，平波电抗器线路侧对地短路。

上述故障的原理都是直流极顶部或中间某点接地，相当于把直流一极的全部或部分倒置，使极的输出能量、已充电的滤波器电容和两直流极线间电容的能量，通过中性母线上的冲击电容器C和金属回路泄放。以工况2为例，见图5，计算结果清楚地说明了这一物理过程：极顶接地故障开始之后，全极电压倒过来加在中性母线上，使中性母线电压升高，电容C充电。通过仿真计算，图6(b)所示的中性母线上的波形也验证了这一点。

图6为上述两种故障工况时中性母线电压升高，清除故障后母线电压缓慢恢复到0的整个过程的过电压仿真波形。从图6可知：①大约0.2s时，发生极顶接地故障，中性母线电压迅速升高；②金属回线运行方式下，直流极线平波电抗器线路侧对地短路时，对中性母线上的设备危害较大。

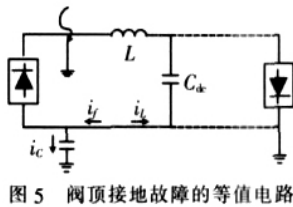


图5 阀顶接地故障的等值电路

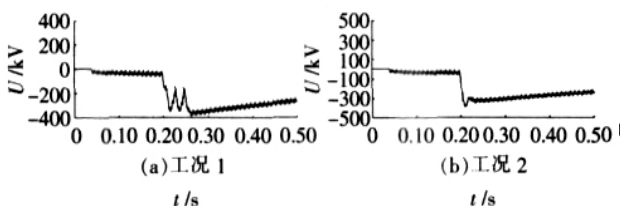


图6 中性母线在两种工况下的电压波形仿真结果

2.1.3 极线过电压

在整流侧不加控制环节作全电压启动，而逆变侧为开断时，由于直流电抗器和系统杂散电容的作

用，回路内将流过振荡电流，类似把阶跃电压加到串连的LC电路上，此时线路可能出现较高的电压^[6]。由于直流双极全电压误启动的可能性很小，所以仅研究了单极全电压误启动引起的过电压问题，其结果也适用于一极运行、另一极发生全电压误启动的情况。

图7为整流侧全电压启动时直流上极线的过电压波形。在金属回线运行方式下，阀触发角 $\alpha=15^\circ$ ；整流站全压启动，逆变阀丢失脉冲闭锁。过电压值在0.04s时达到最大，在0.08s时衰减到稳定值。由于线路的充电电荷通过阀的均压回路和绝缘子的泄漏电阻放电，加上直流控制系统的调节以及保护装置的干预，此时的过电压出现时间较短。

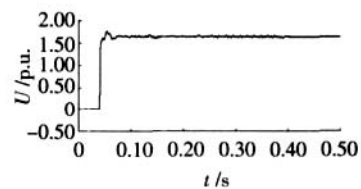


图7 极线电压波形

2.2 有避雷器时的过电压计算

由于避雷器配置方案和避雷器本身的保护特性直接影响着换流站设备上出现的过电压水平，考虑到避雷器布置的基本考虑因素（即换流站每个位置因工作电压波形的不同而需配置不同类型的避雷器），在参考了文[7,8]提供的几种避雷器配置方案之后，笔者采用图8所示的避雷器配置方案。为了与前面的结果（无避雷器保护时）作比较，这里的阀触发角仍取 $\alpha=15^\circ$ ；加入避雷器后，上述几种情况的过电压计算结果见表3。

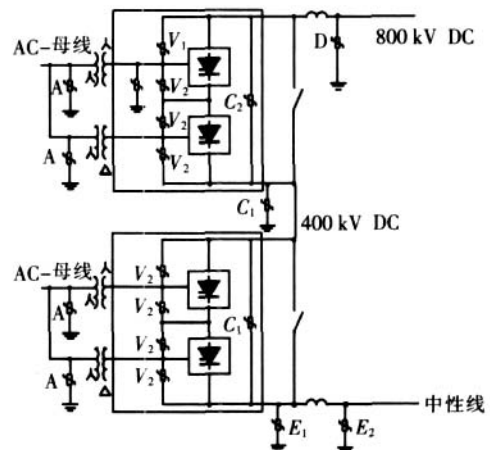


图8 避雷器配置方案

由表3可知，由于避雷器的作用，所计算的各节点过电压受到明显抑制。如发生全电压启动时，直流线路上的过电压由原来的1.9p.u.降至1.5p.u.。值得注意的是，此时直流线路上的巨大过电压贮能必须通过整流侧和逆变侧线路避雷器释放掉，在这种情况下，需对整流侧和逆变侧线路避雷器的能量分配进行详细计算，以确定其通流容量要求。（下转第131页）

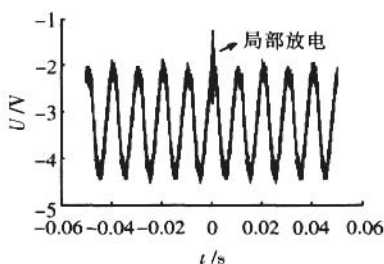


图6 电阻性负载下的输出电压波形

所带的负载为阻容性负载,此时发生器输出为直流电压,电压波纹的大小取决于负载的电容和电阻的大小。负载情况决定了发生器的硅堆导通角,在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 之间变化。假定负载的电容值是基本不变的,则硅堆导通角是由电阻决定的,电阻越大,硅堆导通角越小,电阻越小则硅堆导通角越大;反之亦然。硅堆导通时不影响局部放电的测量,而当所有硅堆都截止时,检测仪器不能准确反映发生器内部的局部放电现象。

在大RC条件下,高压直流发生器可以当作脉冲电流法检测品局部放电的无局放直流试验变压器。

4 结语

此高压直流发生器的特殊结构使得在试验运行中由于负载的不同而影响对其内部局部放电的测量。理论和实验分析表明:电容性负载下,无法准确检测发生器内部局部放电;电阻性负载下,可以准确检测发生器内部局部放电;阻容性负载条件下,取决于负载RC常数大小,RC越大硅堆导通角越小,局部放电可检测性越差,RC越小则硅堆导通角越大,使得局部放电可检测性越好。

参考文献:

- [1] 刘味果. 静电除尘用高压直流发生器的局部放电特征及测试方法[D]. 西安交通大学, 2002.
- [2] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高压电试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 丘昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [5] IEC Standard Publication 270. Partial Discharge Measurements [S]. Second Edition, 1981.

(上接第128页)

表3 有避雷器保护时不同情况下过电压的大小

	整流侧阀桥 顶端电压/p.u.	整流侧线路 首端电压/p.u.	中性母线阀 侧电压/p.u.	中性母线平波电 抗器线路侧电压/p.u.	整流侧阀避雷 器吸收能量/kJ	整流侧线路避 雷器吸收能量/kJ	中性母线避雷 器吸收能量/kJ
换流变A、C两相 同时反极性进波 换流变和阀之间 单相对地短路 平波电抗器线路 侧对地短路 全电压起动, 逆变阀 丢失脉冲闭锁	1.78				160		
			1.88	1.51			229
			1.80	1.52			332
	1.60	1.50				371	

3 结论

笔者针对换流站内可能产生操作过电压的几种典型工况,就系统接有避雷器保护和没有避雷器保护两种情况进行了分析计算,得到以下结论:

(1) 相间的操作过电压能从交流系统以全幅值传送到换流变阀侧,它通过变压器(按变比)出现在不导通的阀上,对整流侧12脉桥而言,阀5承受了最大的操作冲击应力。

(2) 金属回线运行方式下,直流极线平波电抗器线路侧对地短路时在中性母线上的操作应力较为严重,可以用装在换流变压器阀侧的避雷器来限制。

(3) 全电压起动时,直流线路上的巨大过电压贮能必须通过线路避雷器释放掉,在这种情况下,需通过分析计算以确定整流侧和逆变侧线路避雷器通流容量的要求。

参考文献:

- [1] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 1-4.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 舒印彪, 刘泽洪. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 1(1): 1-8.
- [4] 杜忠明. 贵广第二回直流输电工程换流站无功补偿的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 69-74.
- [5] E 乌尔曼. 直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [6] 周浩, 赵智大. 高压直流输电系统全电压起动过电压的研究[J]. 高电压技术, 1995, 21(2): 38-42.
- [7] ELAHI H, FLUGUM R W, WRIGHT S E, et al. Insulation Coordination Progress for HVDC Converter Stations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(2): 1 037-1 048.
- [8] Cigre WG 12. Insulation of HVDC Converter Stations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 387-392.