

天广直流系统中性母线过电压机制研究

袁士超¹, 王东举¹, 陈锡磊¹, 黄志岭², 卢宇²,
田杰², 陈文翰³, 孙可⁴, 周浩¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省 南京市 211102; 3. 浙江省电力试验研究院, 浙江省 杭州市 310014; 4. 浙江省电力公司, 浙江省 杭州市 310027)

Study on Neutral-Bus Overvoltage Mechanism of ± 500 kV DC Power Transmission Project From Tianshengqiao to Guangdong

YUAN Shichao¹, WANG Dongju¹, CHEN Xilei¹, HUANG Zhiling²,
LU Yu², TIAN Jie², CHEN Wenhan³, SUN Ke⁴, ZHOU Hao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu Province, China;
3. Zhejiang Electrical Test and Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China;
4. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Based on post-innovation control and protection strategies for ± 500 kV DC power transmission project from Tianshengqiao to Guangdong, the overvoltages of neutral-bus under various fault conditions are researched and the overvoltage processes under different fault conditions are divided into several stages for the detailed analysis, and the overvoltage mechanism as well as the current direction during various stages are expounded. Research results show that the energy flowing through neutral-bus arrester due to the grounding faults respectively occurred at outgoing line of valve side of converter transformer and that occurred at outgoing line of rectifier bridge cannot be controlled by the control and protection system, so the neutral-bus arrester has to exist enough adequate energy capability; the energy flowing through neutral-bus arrester due to the break fault occurred in DC system can be reduced while the time-delay of protection action is shortened.

KEY WORDS: ± 500 kV DC power transmission project; PSCAD/EMTDC; overvoltage mechanism; neutral-bus arrester; emergency switch off sequence (ESOF); blocking

摘要: 基于天广 ± 500 kV 高压直流输电系统工程改造后的控制和保护策略, 研究了各种故障下中性母线过电压的情况, 将不同故障下的过电压过程分为几个阶段进行分析, 阐述各阶段故障电流流向和过电压机制。研究结果表明, 换流变阀

侧出线和换流桥出线接地故障引起的通过中性母线 E 避雷器的能量不能由控制和保护系统进行控制, 中性母线 E 避雷器必须有足够的流通容量; 直流系统回路断线故障引起的通过中性母线 E 避雷器能量随控制保护动作时延的缩短而减小。

关键词: 天广直流工程; PSCAD/EMTDC; 过电压机制; 中性母线避雷器; 紧急停运; 闭锁

0 引言

高压直流输电系统内部过电压种类繁多, 其过电压水平不仅影响换流变压器、换流阀以及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^[1-3], 因而高压直流输电系统内部过电压是发展超高压及特高压电网所必须研究的重要课题。

中性母线在直流系统正常运行时电压很低, 但当发生某些操作或故障时, 中性母线上易产生过电压, 严重时会造成连接在中性母线上设备损坏。因此, 为限制中性母线过电压, 保护中性母线上设备的安全, 加装在中性母线上的中性母线 E 避雷器的作用显得非常重要。

各种中性母线过电压情况中, 换流变阀侧出线接地故障、换流桥出线接地故障和中性母线 E 避雷器串入直流系统主回路造成的过电压幅值大, 对中性母线避雷器的冲击严重, 在选择中性线上直流设备绝缘水平和中性母线避雷器最大流通容量时, 往往以此计算结果作为参考^[4-5], 因而需详细研究。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2011CB-209405)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB209405).

对于直流系统内部过电压,国内外学者已进行了各方面的研究,文献[6-7]对双极运行方式下,一极线路故障在非故障极线路上产生的过电压作了详细的仿真分析。文献[8]对±500 kV 天广直流系统紧急停运、换流阀丢脉冲、阀顶和阀桥引线故障引起的过电压进行了仿真计算。文献[9]对灵宝背靠背换流站直流侧产生的暂态过电压进行了仿真计算和分析。文献[10-12]对±800 kV 直流系统全电压启动、换流阀丢脉冲、换流变阀侧对地故障和直流极线对地故障等引起的过电压进行了仿真计算。上述文献中有些内容涉及换流变阀侧出线接地故障和换流桥出线接地故障等站内故障,主要是对故障情况的介绍和过电压的简单数值计算,但对于产生这些过电压的机制以及控制保护对这些过电压的影响等内容均未作深入讨论。

笔者在基于PSCAD/EMTDC仿真平台建立的完整的天广高压直流输电系统控制保护模型上,对整流侧换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地、Y/Y 线圈阀侧单相接地、阀顶接地、桥间接地和直流系统回路断线故障在中性母线所引起的过电压进行了仿真,并以分阶段的分析方式将过电压过程细化分解,阐述了各阶段 E 避雷器能量的来源和中性母线过电压机制,分析了不同故障下控制保护系统对于减小流过中性母线 E 避雷器能量的作用,对超高压及特高压直流输电系统的控制保护具有参考意义。

1 天广直流系统介绍

天生桥—广州±500 kV 直流输电工程包括天生桥换流站、广州北郊换流站、天生桥—北郊的高压直流输电线路、两站的接地极及其引线以及通信系统等。工程的直流额定电压为±500 kV,直流额定电流为1 800 A,直流额定功率双极为1 800 MW,单极为900 MW,每极采用12脉动换流器接线。自2000年12月26日投运以来,为西电东送和广东地区的经济发展做出了很大贡献^[8,13-14]。

随着运行时间的增长,天广直流工程控制保护系统软、硬件缺陷逐渐暴露出来,多次造成单极强迫停运,甚至双极强迫停运,给天广直流工程的运行、维护带来了前所未有的压力。南方电网决定委托南瑞继保公司对该直流控制系统进行整体改造,以满足天广直流工程的安全运行和维护需求。本文中的仿真计算是按照改造后的天广直流工程的控制保护系统进行的。

2 天广直流系统研究条件和仿真模型

2.1 天广直流系统主要参数

天广±500 kV 高压直流输电工程系统主要参数见表1。

表1 天广直流输电系统基本参数

Tab. 1 Basic parameters of Tian-Guang HVDC Project				
换流站	交流电压		直流电压	
	额定值/kV	最大值/kV	最小值/kV	额定值/kV
天生桥	230	252	209	500
广州	230	242	209	500
换流站	直流电压		直流电流	
	最大值/kV	最小值/kV	额定值/A	最小值/A
天生桥	515	485	1 800	180
广州	515	485	1 800	180

2.2 直流系统运行条件

为了计算得到最大过电压值,系统运行条件从严选取如下:

- 1) 交流系统采用最大运行电压1.1 pu,即整流侧为252 kV,逆变侧为242 kV。
- 2) 交流系统等值阻抗取与交流系统最大短路容量相对应的值,整流侧为2.8 Ω,逆变侧为1.2 Ω。
- 3) 直流电流取允许2 h 短期过负荷情况下的运行电流,即1.1倍额定值,为1 980 A。

2.3 仿真软件和控制保护系统

本文基于PSCAD/EMTDC仿真平台,建立了天生桥—广州±500 kV 直流输电模型。其中直流系统的控制保护系统模型由南瑞继保公司利用Hidraw系统开发,它与实际系统特性相吻合^[15],保证了仿真结果的准确性。

2.4 整流站避雷器布置及参数

整流侧换流站避雷器布置方案如图1所示,其中E避雷器为中性母线避雷器,天广直流系统安装的避雷器由Siemens公司生产^[5,16],具体参数如表2所示。在单极金属回路运行方式下,整流站投入6台E避雷器,每台通流容量为2.6 MJ。

2.5 保护动作策略

- 1) 紧急停运(emergency switch off sequence,

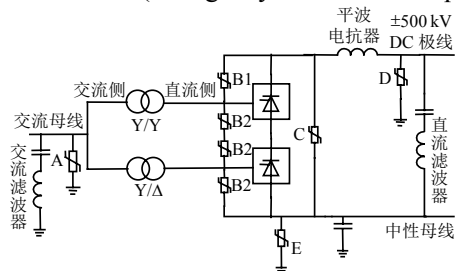


图1 天广±500 kV 直流输电工程避雷器配置方案
Fig. 1 MOA configuration scheme of Tian-Guang HVDC project

表 2 中性母线避雷器参数
Tab. 2 Parameters of neutral-bus arrester

换流站	中性母线避雷器配置数/套	总通流容量/MJ	中性母线避雷器额定电压/kV	中性母线避雷器参考电压/kV
	天生桥	6	15.6	52(均方根值)
广州	5	13.0	52(均方根值)	>74

换流站	中性母线避雷器参考电流/mA	中性母线避雷器通流容量/MJ	操作波保护水平/(kV/kA)
	天生桥	20	2.6
广州	20	2.6	97/15.8

ESOF)。紧急停运过程先迅速将整流器触发角移相到 120°~ 170°间某个角度，各工程的实际值略有差别，该步骤也称快速移相。快速移相后，直流电流很快衰减。当直流电流下降到零时，分别闭锁两侧换流器的触发脉冲，继而跳开两侧换流变压器的网侧断路器^[3]。

2) 闭锁。即闭锁触发脉冲，使换流器各阀在电流过零后关断^[17]。

2.6 故障工况

根据本文引言中的介绍，选取以下两种故障类型进行仿真分析。

1) 故障 1。换流变阀侧出线单相金属性接地，故障持续时间为 100 ms。考虑到在双极方式和单极大地回线方式运行时整流站和逆变站中心母线接地，单极金属回线方式时逆变站也接地，这有效抑制了中性母线上的过电压，因此选择单极金属回线运行方式下整流侧换流站中性母线 E 避雷器的情况为研究对象，分别在以下 4 种不同工况下进行仿真计算：①整流侧换流变 Y/Δ 线圈阀侧单相接地；②整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地；③整流侧阀顶接地短路；④整流侧桥间接地短路。

故障 1 启动的保护通常有紧急停运和闭锁，这两种保护下的过电压机制类似，但流过 E 避雷器的能量有差别，本文针对紧急停运保护下各种过电压的机制进行重点讨论，同时也列出闭锁保护情况下的各故障能量计算结果。

2) 故障 2。回路断线，中性母线 E 避雷器串入直流系统主回路，故障持续时间为 100 ms。在此故障下几种运行方式的过电压机制相同，此处只以单极大地回路运行方式下整流侧接地极引线断线为例。

故障 2 启动的保护为整流站发出紧急停运和投高速接地开关(high speed ground switcher, HSGS)信号。

3 整流侧换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地仿真

3.1 仿真结果

故障示意图见图 2。图 3 和图 4 为 PSCAD/EMTDC 对整流侧换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地的仿真结

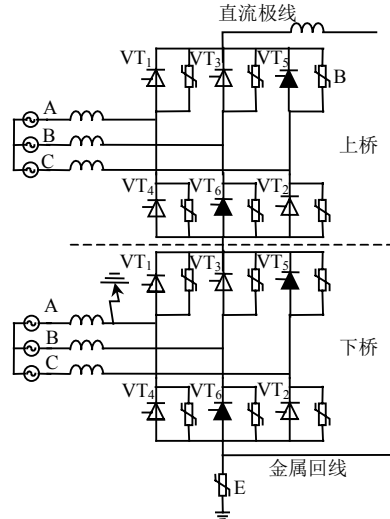


图 2 整流站换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地故障示意

Fig. 2 Schematic diagram of single-phase ground fault occurred at lower rectifier bridge side of wye-delta connected winding of converter transformer

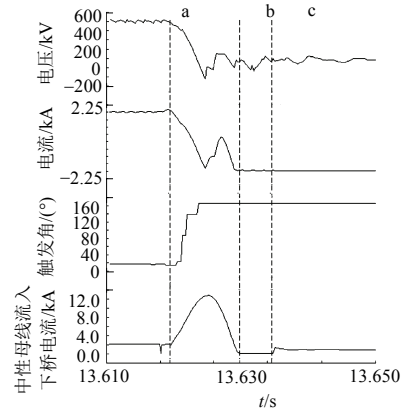


图 3 故障时整流站仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms of rectifier during the fault

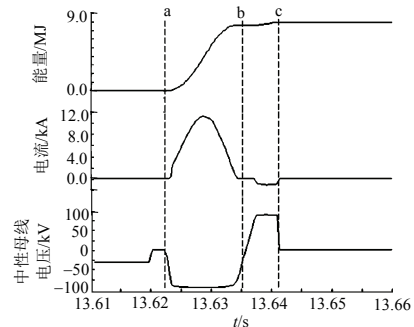


图 4 故障后中性母线避雷器能量积累过程和中性母线电压

Fig. 4 Post-fault energy accumulation of arrester E and neutral-bus voltage

果。图 3 中的波形从上至下分别为：直流极线电压、直流极线电流、滞后触发角 α 、中性母线流入下 6 脉动整流桥电流；图 4 从上至下分别为中性母线避雷器通过的能量、电流和中性母线电压。

图 3 和图 4 中，标注了 3 个时刻 a、b 和 c，其中，a 为故障发生后，下阀桥 VT₆ 换相导通时刻；b 为下阀桥与中性母线相连的阀 VT₄、VT₆ 和 VT₂ 全部关断时刻；c 为下阀桥 VT₄ 再次触发导通时刻。

仿真结果显示，整流站中性母线最大过电压为 98.6 kV，中性母线避雷器通过最大电流 11.26 kA，通过能量 7.97 MJ，未超过该运行方式下避雷器的最大通流容量。

3.2 仿真结果分析

故障时刻选取在 1 个周期内流过故障电流的阀刚换相导通的时刻，由于直流系统的脉冲控制是离散的，控制保护只能在下一脉冲到来后起到保护作用，此刻距下次换相时间最长，保护作用到触发脉冲上的延时最长，因而在此时间点发生的故障为中性母线 E 避雷器的最严酷工况，为确保 E 避雷器设计可以承受最严重过电压，仿真分析均基于上述故障发生时刻进行。此处以故障发生在 A 相为例，接地故障发生在下阀桥 VT₄ 和 VT₆ 的换相时刻，即 A 相电压上升，B 相电压下降，此时 VT₄ 处于导通状态，VT₆ 恰好触发导通。

本故障可分为 3 个阶段进行故障过程分析：

1) 第 1 阶段(a—b 时刻，主放电阶段)。按图 2 所示，故障发生时整流站下 6 脉动换流桥中的阀 VT₆ 导通，换流变 A、B 两相形成的交流电源 U_{ba} 通过 VT₆ 和故障接地点并联在整流侧中性母线 E 避雷器上，也并联在金属回线与逆变侧接地极两端，故障简化如图 5 所示。由图 3—5 可见，由于故障电源的存在，从时刻 a 到时刻 b 从中性母线流入下 6 脉动桥的电流不再仅仅是从金属回线流入中性母线的电流，而是同时汇入了 E 避雷器上的电流，由电流波形可见流入下 6 脉动桥的电流主要是流过 E 避雷器的故障电流。故障时刻因 VT₆ 恰好触发导通，保护启动后触发角移至 164°，触发角变大使本次 VT₆ 触发导通与下次 VT₂ 的触发时间间隔变大，VT₆ 导通时间大于正常 7.5 ms (正常导通时间加换相时间)，约导通 10 ms 后 VT₆ 中电流过零关断，VT₂ 由于保护使触发角增大而避免被触发导通，从而使 E 避雷器不再与交流电源构成回路，第 1 阶段结束。

本阶段 E 避雷器动作，由于 E 避雷器流过从接地

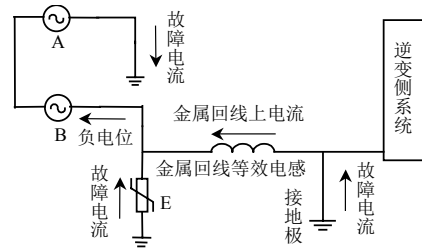


图 5 整流站换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地故障第 1 阶段简化电路

Fig. 5 Simplified circuit for the first stage of single-phase ground fault occurred at lower rectifier bridge side of wye-delta connected winding of converter transformer

点到中性母线方向的电流，中性母线呈负电位。本阶段通过 E 避雷器的能量占此故障下该避雷器所消耗能量的主要部分。由于直流系统的脉冲控制是离散的，保护不能在下一脉冲到来前立即起作用，从而无法控制在该阶段流过中性母线 E 避雷器的能量。

2) 第 2 阶段(b—c 时刻，金属回线放电阶段)。因第 1 阶段中性母线呈负电位，整流侧下 6 脉动换流桥中与中性母线相连的阀 VT₄、VT₆ 和 VT₂ 均承受反向电压，全部关断，波形图 3 和 4 中，从时刻 b 到时刻 c 自中性母线流入下 6 脉动换流桥的电流为零，中性母线电流无法通过阀流入故障接地点；但由于直流线路存在对地分布电容，自身又有分布电感，通过金属回线的电流不能立即减小为零，此时金属回线相当于一个电源，通过中性母线 E 避雷器和逆变站的接地点形成回路，在 E 避雷器中流过一部分能量，故障简化如图 6 所示。从图 4 的 E 避雷器电流波形可见从时刻 b 到时刻 c，E 避雷器将流过与故障初期方向相反的电流，但电流幅值相对较小，中性母线呈正电位。

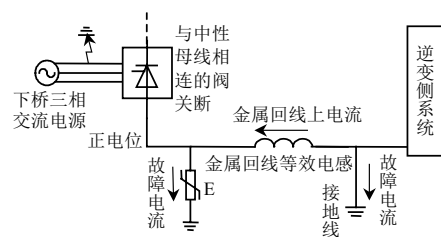


图 6 整流站换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地故障第 2 阶段简化电路

Fig. 6 Simplified circuit for the second stage of single-phase ground fault occurred at lower rectifier bridge side of wye-delta connected winding of converter transformer

3) 第 3 阶段(c 时刻后，触发导通阶段)。因第 2 阶段中性母线呈正电位，由图 2 可见此时下阀桥 VT₄ 阴极与故障接地点相连，导致 VT₄ 两边承受正向电压，c 时刻有 VT₄ 的脉冲触发，VT₄ 导通，由图 3 的波形可见，中性母线瞬间被拉为地电位，E

避雷器两端电压为零，E 避雷器电流值为零，从中性母线流入下 6 脉动桥的电流不为零，说明金属回线电流不再经过 E 避雷器，而是直接流入故障接地点，如图 7 所示，中性母线拉为地电位后，中性母线 E 避雷器通过的能量不再增加。

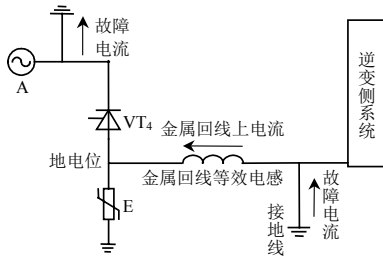


图 7 整流站换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地故障第 3 阶段简化电路

Fig. 7 Simplified circuit for the third stage of single-phase ground fault occurred at lower rectifier bridge side of wye-delta connected winding of converter transformer

Y/Δ线圈阀侧单相接地故障导致中性母线 E 避雷器动作，故障初期 E 避雷器能耗快速增大。由于保护及时启动，中性母线的过电压得到控制，避雷器能耗增加也不断减小，最后总能耗未超过通流容量。

4 整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地仿真

4.1 仿真结果

整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地的仿真结果表明，整流站中性母线最大过电压为 97.9 kV，中性母线避雷器通过最大电流为 10.48 kA，通过能量为 9.15 MJ，低于该运行方式下避雷器的最大通流容量。

4.2 仿真结果分析

本故障过程与 Y/Δ线圈阀侧单相接地故障基本相同，但只有 2 个阶段，没有中性母线接地时的第 3 阶段。

由于故障点在上桥，故障点到中性母线间隔有 3 层阀，不可能直接与故障点地相连接，故不存在再将中性母线拉为地电位的第 3 阶段，从而金属回线上的电流能更多的流入 E 避雷器。由于本故障主放电阶段中的故障电源由下 6 脉动换流桥的直流电压与上 6 脉动换流桥交流线电压 U_{ba} 串联构成，较 Y/Δ线圈阀侧单相接地时故障电源电压大，因此在这种情况下进入 E 避雷器的能量较 Y/Δ线圈阀侧单相接地故障大。

5 整流侧阀顶接地短路

5.1 仿真结果

整流侧阀顶接地短路的仿真结果表明，整流站

中性母线最大过电压为 96.5 kV，中性母线避雷器通过最大电流 9.52 kA，通过能量 8.66 MJ，未超过该运行方式下避雷器的最大通流容量。

5.2 仿真结果分析

本故障与 Y/Y 线圈阀侧单相接地故障过程相类似，同样不存在中性母线接地的第 3 阶段。不同之处在于故障电源由整流站上、下 6 脉动换流桥的直流电压串联形成，故障电源多串联入一层阀，由于阀的阻碍，其注入 E 避雷器的能量较 Y/Y 线圈阀侧单相接地故障小。

6 整流侧上下桥间接地短路

6.1 仿真结果

整流侧桥间接地短路的仿真结果表明，整流站中性母线最大过电压为 97.6 kV，中性母线避雷器通过最大电流 9.43 kA，通过能量 7.61 MJ，未超过该运行方式下避雷器的最大通流容量。

6.2 仿真结果分析

由于此故障中故障电源少串入 1 组 6 脉动阀，E 避雷器上通过的能量较阀顶接地故障少，此故障原理和阀顶故障相似，其故障过程不予赘述。

7 闭锁保护下换流变阀侧出线和换流桥出线接地故障情况

若换流变阀侧出线接地故障和换流桥出线接地故障采用闭锁保护，其过电压发展过程与整流侧换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地时采用紧急停运保护的过程类似，不同之处是没有第 3 阶段的触发换相，即采用闭锁保护时，本文 2.6 节中列出的 4 种故障工况都只有主放电阶段和金属回线放电阶段。与采用紧急停运保护相比，中性母线 E 避雷器流过的能量数值上略有差异，如表 3 所示。这 8 种情况中紧急停运保护下整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地故障在中性母线 E 避雷器流过的能量最大。其余故障工况下各阶段过电压情况与采用紧急停运保护时类似，此处不再赘述。

表 3 2 种保护下 E 避雷器流过的能量
Tab. 3 The energy absorbed by arrester E under the four kinds of ground faults conditions protected by ESOF and blocking protection respectively

故障类型	E 避雷器流过的能量/MJ	
	紧急停运保护	闭锁保护
整流侧换流变 Y/Δ线圈阀侧单相接地	7.97	8.89
整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地	9.15	8.60
整流侧阀顶接地	8.66	8.02
整流侧桥间接地	7.61	7.68

8 整流侧接地极引线断线故障

8.1 仿真结果

整流侧接地极引线断线故障的示意图见图 8。

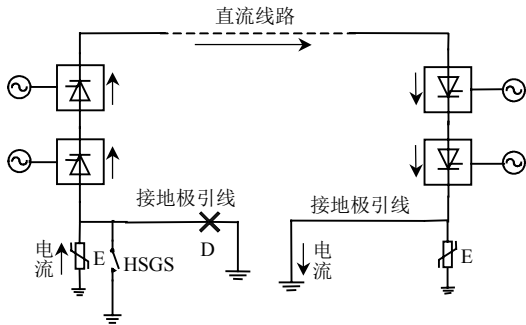


图 8 整流侧接地极引线断线故障示意
 Fig. 8 Schematic diagram of break fault occurred at rectifier bridge side of earth electrode line

图 9 和图 10 给出了用 PSCAD/EMTDC 对整流侧接地极引线断线故障进行仿真的结果。图 9 中各波形从上至下分别为直流极线电压、直流极线电流和滞后触发角 α ；图 10 中各波形从上至下分别为中性母线避雷器通过的能量、电流和中性母线电压。

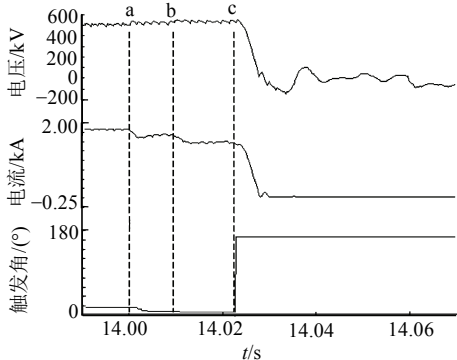


图 9 故障时整流站仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of rectifier during the fault

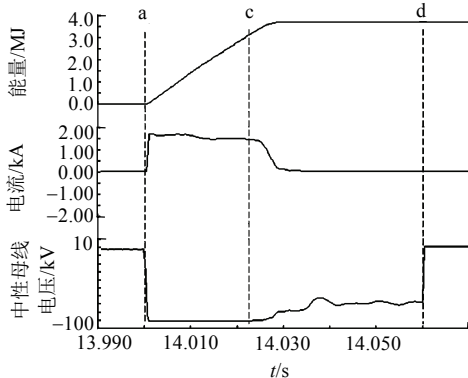


图 10 故障后中性母线避雷器能量积累过程和
 中性母线电压

Fig. 10 Post-fault energy accumulation of arrester E and neutral-bus voltage

图 9 和图 10 中，标注了 4 个时刻 a、b、c 和 d，其中，a 为故障发生时刻；b 为整流侧极线电流瞬时小幅下降时刻；c 为 ESOF 动作时刻；d 为整流

侧 HSGS 投入时刻。

仿真结果显示，整流站中性母线最大过电压为 90.8 kV，中性母线避雷器通过最大电流 1.79 kA，通过能量 2.8 MJ，未超过该运行方式下避雷器的最大通流容量。

8.2 仿真结果分析

单极大地运行方式正常运行时，逆变站电流通过接地极流入大地，从整流站接地极流入整流侧接地极引线，再进入整流站。当整流站接地极引线发生断线时(图 8 中 D 处断开)，逆变侧电流只能通过整流侧 E 避雷器流入整流侧换流阀，E 避雷器相当于一个电阻串联在直流回路中，中性母线 E 避雷器将流过故障电流。

整个故障过程可以根据保护作用的时间分为 3 个阶段进行分析：

1) 第 1 阶段(a—c 时刻，保护未动作阶段)。从 E 避雷器的波形可知，a 时刻故障发生后流过 E 避雷器的电流和极线电流相同，E 避雷器相当于一个电阻串联在直流回路中，由于回路电阻瞬间增加，从电流波形上看 a 时刻直流电流较系统额定电流有小幅下降，同时整流侧定电流控制原则为保持电流值不变，控制系统为回升电流，将触发角移到 15° 以下，使直流电压有所升高。本阶段通过的能量占了此故障下 E 避雷器上消耗能量的主要部分。

2) 第 2 阶段(c—d 时刻，保护动作后到 HSGS 投入之前)。故障持续一段时间后，保护在时刻 c 动作，触发角移至 164° ，整流侧电压和电流立即下降，流过 E 避雷器的电流减小，中性母线过电压也减小。

3) 第 3 阶段(时刻 d 以后，HSGS 投入之后)。由于整流侧中性母线上的 HSGS 从启动到投入存在一定时延，保护在时刻 c 启动而 HSGS 在时刻 d 投入，HSGS 一经投入，从波形来看，中性母线瞬间被拉为地电位，E 避雷器两端电压为零，E 避雷器不再流过电流，保护的启动和 HSGS 的投入的时刻直接决定了流过 E 避雷器的能量。

9 结论

1) 中性母线 E 避雷器能有效限制中性母线上的过电压，仿真中中性母线过电压均在 100 kV 以下。

2) 整流侧换流变阀侧出线接地故障或换流桥出线接地故障下，中性母线 E 避雷器消耗的能量主

要来自故障过程的第 1 阶段, 而第 1 阶段持续时间为 10 ms 左右。鉴于直流系统的脉冲控制是离散的这一特点, 控制保护只能在下一脉冲到来后起到保护作用, 无法对故障作出更快响应, 中性母线 E 避雷器不可避免地要承受保护起作用前流过的较大能量, 因此中性母线 E 避雷器在设计时必须有足够的流通容量。

3) 整流侧换流变阀侧出线接地故障和换流桥出线接地故障, 在紧急停运和闭锁这 2 种保护下的过电压机制类似, 中性母线过电压数值几乎一致, 只是在流过 E 避雷器能量上有所区别。分别采用这 2 种保护方式的这 4 种故障工况中, 对整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地故障采用紧急停运保护时, 在 E 避雷器上流过的能量最大。

4) 直流运行回路断线导致中性母线 E 避雷器串入直流系统主回路的能量由故障的持续时间决定, 而保护启动后触发角移相和 HSGS 的投入立即减小了流过 E 避雷器的故障电流, 因此保护应尽快启动以减少流过 E 避雷器的能量。

5) 保护正常动作的情况下, 对中性母线 E 避雷器产生冲击的各种故障工况中, 采用紧急停运保护的整流侧换流变 Y/Y 线圈阀侧单相接地故障在中性母线 E 避雷器中流过的能量最大, 因而在选择中性母线 E 避雷器最大流通容量时, 可以此计算结果作为参考。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982: 405.
- [2] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 364.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 214、103.
- [4] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 87.
- [5] Siemens. Insulation coordination study report, part1: Tian-Guang HVDC transmission project[R]. Germany: Siemens, 1997.
- [6] Kimbark E W. Transient overvoltage caused by monopolar ground fault on bipolar DC line: theory and simulation[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1970, PAS-89(4): 584-592.
- [7] Hingorani N G. Transient overvoltage on a bipolar HVDC overhead line caused by DC line faults[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1970, PAS-89(4): 592-603.
- [8] 荆勇, 任震, 杨晋柏, 等. 天广直流输电系统运行过电压的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 1-3.
Jing Yong, Ren Zhen, Yang Jinbo, et al. Study on overvoltage of Tian-Guang HVDC transmission[J]. High voltage Engineering, 2002, 28(4): 1-3(in Chinese).
- [9] 聂定珍, 郑劲. 灵宝换流站直流暂态过电压研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 50-51.
Nie Dingzhen, Zheng Jin. DC transient overvoltage of Lingbao B-B HVDC converter station[J]. High voltage Engineering, 2004, 30(11): 50-51(in Chinese).
- [10] Zhao Jie, Wang Gang, Yin Kai, Li Haifeng. Study of overvoltages on ± 800 kV UHVDC transmission system[C]. The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission: 2006:187-191.
- [11] 安萍, 苟锐锋, 程晓绚, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站过电压保护特点及直流暂态过电压计算[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 351-353.
An Ping, Gou Ruifeng, Cheng Xiaoxuan, et al. Characteristics of over voltage Protection in ± 800 kV ultra high voltage direct current convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 351-353(in Chinese).
- [12] 司马文霞, 庞锴, 杨庆. ± 800 kV 特高压换流站直流侧操作过电压的仿真与研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 126-131.
Sima Wenxia, Pang Kai, Yang Qing. Simulation and investigation on switching overvoltage at DC side of UHVDC converter station with capacity of ± 800 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 126-131(in Chinese).
- [13] 丁钊, 韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 49-54.
Ding Zhao, Han Weiqiang. Summary of bipolar operation situation of Tian-Guang DC power transmission system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 49-54(in Chinese).
- [14] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统的基本控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 22-26.
Zhu Taoxi, Wang Chao. Basic control technique for HVDC transmission system from Tianshengqiao to Guangzhou[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 22-26(in Chinese).
- [15] 黄志岭, 田杰. 基于详细直流控制系统模型的 EMTDC 仿真[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 46-48.
Huang Zhiling, Tian Jie. EMTDC simulation of based on detailed control model of HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 46-48(in Chinese).
- [16] Siemens. Equipment specifications, surge arresters, type E, Tian-Guang HVDC transmission project[R]. Germany: Siemens, 1997.
- [17] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 150.



袁士超

收稿日期: 2010-11-30。

作者简介:

袁士超(1986), 男, 硕士研究生, 主要从事高压、特高压直流输电过电压方面的研究;

王东举(1984), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统过电压研究, E-mail: shuwei1204@163.com;

周浩(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压技术应用方面的研究。

(编辑 杨天和)