

# ± 1100 kV 特高压换流站直流操作过电压研究

邓旭<sup>1</sup>, 王东举<sup>1</sup>, 沈扬<sup>2</sup>, 周浩<sup>1</sup>, 陈锡磊<sup>3</sup>, 孙可<sup>4</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310014;  
3. 浙江省慈溪市供电局, 浙江 慈溪 315300; 4. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 基于准东—四川±1100 kV 特高压直流输电工程, 详细分析了特高压直流换流站阀厅和直流场的操作过电压机理, 并仿真计算了高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组接地、低压端 Y/Y 换流变阀侧绕组接地、交流侧相间操作冲击、逆变侧失交流电源、全电压起动和逆变侧闭锁而旁通对未解锁等故障在换流站设备上产生的过电压值, 给出了准东换流站相应避雷器承受的最大过电压和能量。计算结果可为该特高压工程换流站设备的绝缘配合及相关设备选型、试验提供重要依据。

**关键词:** 特高压输电; 直流输电; 换流站; 避雷器; 操作过电压; 能量

**中图分类号:** TM 721.1; TM 723

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.024

## 0 引言

特高压直流输电作为一种远距离、大容量输电技术, 是实现我国能源资源优化配置的有效途径<sup>[1-7]</sup>。我国能源资源主要集中在西部地区, 而负荷中心主要集中在中东部地区, 例如作为未来能源开发重点的新疆煤电基地向能源匮乏的中东部地区进行远距离、大容量输电, 输电距离将在 2 500 km 以上, 远超过 ±800 kV 特高压直流的经济输电距离<sup>[8]</sup>。随着我国 ±800 kV 特高压直流输电工程的顺利开展和实施, 为了满足未来更大容量、更远距离的输电需求, 有必要进一步研究更高电压等级的直流输电技术<sup>[9-12]</sup>。目前世界上最高电压等级的直流输电工程是 ±800 kV 直流输电, ±1 100 kV 直流是我国正在研究的一个全新输电电压等级, 并计划用于规划建设中的准东—四川特高压直流输电工程<sup>[13-17]</sup>。因此开展 ±1 100 kV 特高压直流输电的研究具有重大现实意义, 同时对于提高我国直流输电技术的自主创新能力也至关重要。

高压直流输电系统运行时因故障、操作等原因会在换流站设备上产生各种过电压。直流系统的过电压水平不仅影响到换流变压器、换流阀、断路器、输电线路等电力设备绝缘强度的合理设计, 而且还直接关系到系统能否安全可靠地运行。目前, 国内外学者围绕直流换流站的过电压进行了广泛研究, 文献<sup>[18-20]</sup>对 ±500 kV 天广直流输电工程换流站的换流阀过电压和中性母线过电压机理进行了分析, 文献<sup>[21-22]</sup>研究了灵宝背靠背换流站和宁东—山东 ±660 kV 直流换流站的暂态过电压, 文献<sup>[23-25]</sup>研究了 ±800 kV 特高压直流换流站的暂态过电

压。上述文献均是对 ±800 kV 及以下电压等级直流换流站的过电压机理分析和仿真计算, 但 ±1 100 kV 特高压直流输电的电压等级更高、输送容量更大、输电距离更长, 故障或操作在设备上产生的过电压也将更大, 这将严重威胁换流站设备的绝缘, 而目前国内外对 ±1 100 kV 特高压直流换流站过电压研究报道的相关文献极少。因此有必要对 ±1 100 kV 特高压直流换流站的过电压进行深入细致的研究。

本文对 ±1 100 kV 特高压直流换流站的直流操作过电压进行了研究, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上建立了准东—四川 ±1 100 kV 特高压直流输电模型, 并对准东换流站典型故障工况下的过电压进行了仿真计算, 得到了故障下相应避雷器承受的最大过电压和能量。研究结果可为该工程后续换流站的绝缘配合研究提供重要参考。

## 1 交直流系统参数

准东—四川 ±1 100 kV 特高压直流输电工程双极额定输送功率 10 450 MW, 送端位于新疆准东煤电基地, 受端位于四川成都。两端换流站每极采用 550 kV + 550 kV 2 个 12 脉动换流器串联的接线方式, 直流系统单极金属回线运行时, 成都换流站为接地站。工程的基本运行参数如表 1 所示。

表 1 准东—四川 ±1 100 kV 特高压直流工程基本运行参数  
Tab.1 Operating parameters of Zhundong-Sichuan ±1 100 kV UHVDC project

系统参数	准东	成都
交流系统额定运行电压 $U_{acN}/kV$	770	525
交流最高运行电压 $U_{acmax}/kV$	800	550
极端最低运行电压 $U_{acmin}/kV$	713	475
额定直流电压 $U_{dN}/kV$	1 100	1 100
直流最高运行电压 $U_{dmax}/kV$	1 122	1 122
额定直流电流 $I_{dN}/kA$	4.75	4.75
触发角 $\alpha/(\circ)$	15	15
熄弧角 $\gamma/(\circ)$	17	17

收稿日期: 2012-12-18; 修回日期: 2013-08-27  
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB209405)  
Project supported by the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2011CB209405)

换流站每极平波电抗器电感量按 240 mH 考虑,并采用分置于直流极母线与中性母线(简称平抗分置)的布置方式,各为 120 mH(60 mH+60 mH)。

## 2 换流站避雷器布置及参数

换流站设备的主要过电压保护装置是氧化锌避雷器。目前国内外已投运的  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程仅有 2 项,并且均建在我国,其换流站的避雷器布置主要有 2 种:云南—广东  $\pm 800$  kV 特高压直流工程采用的 SIEMENS 推荐方案;向家坝—上海  $\pm 800$  kV 特高压直流工程采用的 ABB 推荐方案。这 2 种避雷器布置方案各有优缺点<sup>[26-27]</sup>。2 种方案的主要区别在于对高端换流变压器阀侧绕组的保护,向上工程采用 MH 与 V 避雷器串联的保护方式,每站每极仅需安装 1 台 MH 避雷器,避雷器数量较少,避雷器布置相对简单,缺点是换流变阀侧绕组的绝缘水平较高;而云广工程采用 A2 避雷器直接保护高端换流变压器阀侧绕组,可以降低该处设备的绝缘水平,缺点是每站每极需安装 3 台,会占用阀厅较大的空间。

在特高压直流系统中,由于采用了双 12 脉动换流器串联的接线方式,最高端 Y/Y 换流变阀侧电压很高,对绝缘的要求也很高。而过高的绝缘会导致换流变压器的体积增大,给设备的制造运输带来较

大困难。并且,在特高压直流系统中,设备的成本与绝缘水平之间呈现强烈的非线性关系,绝缘水平的略微提高会导致设备绝缘尺寸的急剧增大,从而设备费用大幅度增加<sup>[28]</sup>。因此,在特高压直流系统中,高压端换流变压器阀侧套管的绝缘水平通常是换流变研制的最大瓶颈,降低高压端换流变压器阀侧套管的绝缘水平对降低整个工程的绝缘费用非常重要。考虑到  $\pm 1100$  kV 特高压直流输电工程的电压等级比  $\pm 800$  kV 更高,高端 Y/Y 换流变阀侧绕组的绝缘水平将直接关系到换流变压器的制造以及换流站设备的绝缘费用,因此降低该处设备的绝缘水平对于整个工程而言是至关重要的。而根据前文分析知,云广工程采用的避雷器布置方案下换流变阀侧设备的绝缘水平更低。

因此,本文在准东—四川  $\pm 1100$  kV 特高压直流工程换流站绝缘配合研究中考虑准东换流站的避雷器按云广工程布置,即如图 1 所示的避雷器布置方案,图中各避雷器的描述如表 2 所示。

准东换流站避雷器的基本参数如表 3 所示。

## 3 换流站直流操作过电压分析

特高压换流站直流侧设备包括阀厅内设备和直流场设备,其中直流场设备又分为直流母线相关设备和中性母线相关设备,下面分别对各种设备上的

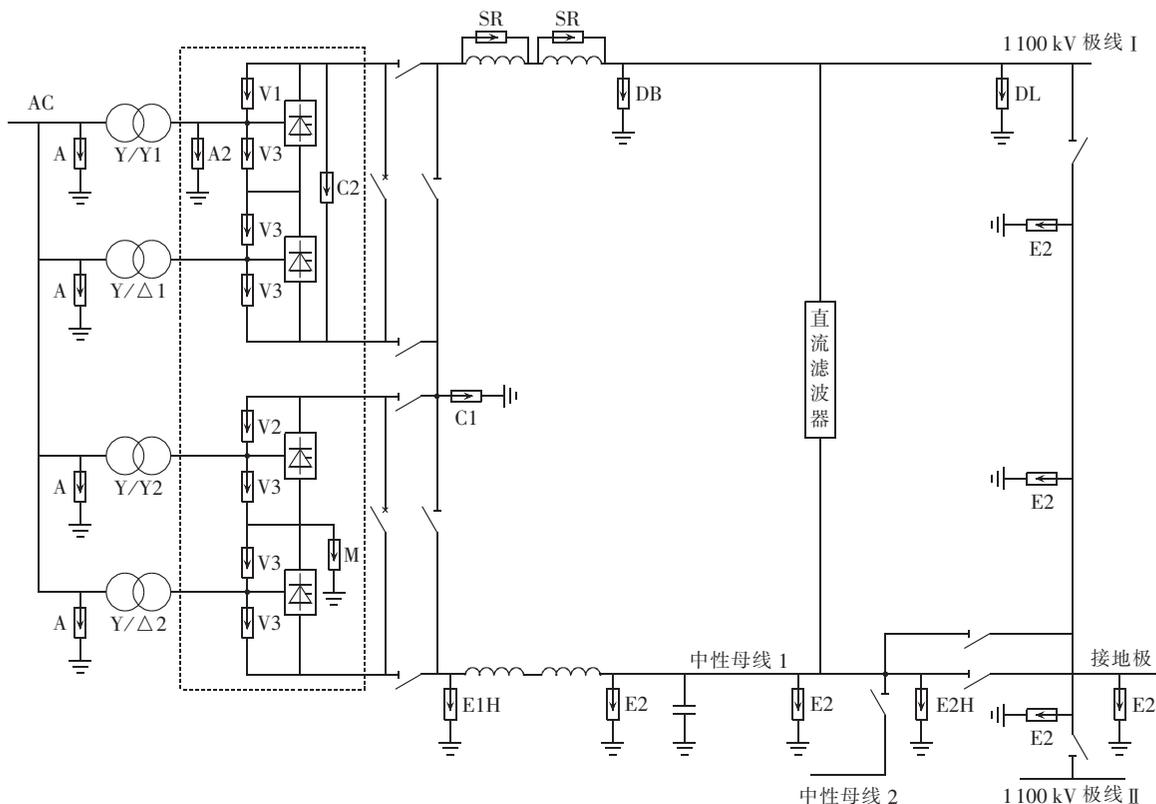


图 1 准东换流站避雷器布置方案

Fig.1 Disposal scheme for arresters of Zhundong converter station

表 2 换流站避雷器描述

Tab.2 Arrester definitions of converter station

避雷器	描述
A	交流母线避雷器
A2	最高端换流变压器阀侧避雷器
V1/V2/V3	阀避雷器
DB/DL	直流母线/极线避雷器
C1	下 12 脉动换流单元避雷器
M	下 12 脉动换流单元中点避雷器
C2	上 12 脉动换流单元避雷器
E1H	中性母线平抗阀侧高能避雷器
E2	中性母线避雷器
E2H	中性母线高能避雷器
SR	平波电抗器并联避雷器

表 3 准东换流站避雷器参数

Tab.3 Arrester parameters of Zhundong converter station

避雷器	CCOV/kV	PCOV/kV	参考电压/kV	能量吸收能力/MJ
A2	1233.8	1288.5	1356.3	24.1
V1	353.95	410.27	410.27	16.2
V2	353.95	410.27	410.27	7.2
V3	353.95	410.27	410.27	3.6
DB	1122	—	1320	24.5
DL	1122	—	1320	24.5
C1	611	685	761	13.8
M	354	410.27	461	4.25
C2	683.8	718	797.8	14.2
E1H	167	221.5	304	21.75
E2	55	—	278	2.45
E2H	55	—	278	28.2
SR	44	—	483(有效值)	3.3

注:CCOV 为持续运行电压的最高幅值,不包括换相过冲;PCOV 为持续运行电压的最高峰值,包括换相过冲。

典型操作过电压进行分析。

### 3.1 阀厅内操作过电压

换流站阀厅内的晶闸管阀由并联在其两端的阀避雷器 V 直接进行保护,如图 1 中所示的 V1、V2 和 V3。当发生高压端 Y/Y 换流变与换流阀之间接地短路时,故障简化示意如图 2 所示,故障发生后换流变阀侧绕组 A 相交流电压立即降为 0,直流极线由于存在较大的对地电容从而对地电压不会突变,故加在阀 V<sub>T1</sub> 两端的电压为较大的反向电压,从而导致换流阀关断。而直流线路和滤波器上储存了较大的能量,在阀关断后将通过阀避雷器释放,可见该能量主要加到上 12 脉动换流单元最上层阀避雷器 V1 上,因此该故障下阀避雷器 V1 上承受的能量比 V3 大。另外,来自交流侧的操作冲击也会加到阀避雷器上,但其释放的能量通常比高压端 Y/Y 换流变与换流阀之间发生接地故障时低。故阀避雷器 V1 的决定性故障为高压端 Y/Y 换流变与换流阀之间的接地短路;同理,阀避雷器 V2 的决定性故障为直流系统 1/2 双极不平衡运行方式下(如极 I 下 12 脉动换流器单独运行,极 II 双 12 脉动换流器运行),极 I 低压端 Y/Y 换流变与换流阀之间发生接地短路。此

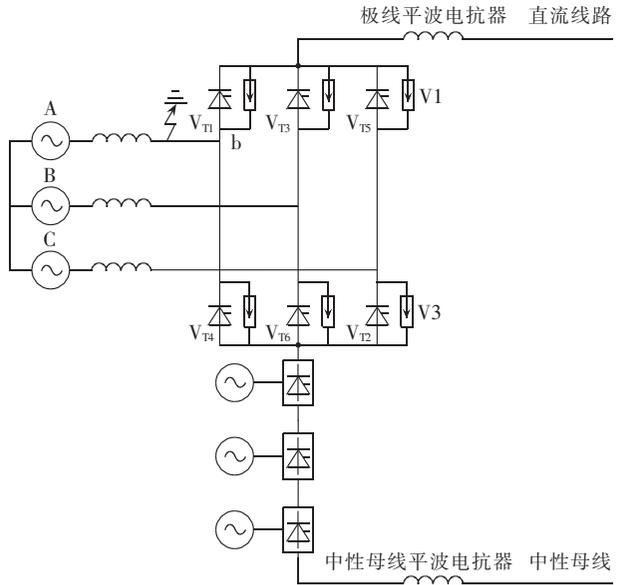


图 2 高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地简化示意  
Fig.2 Schematic diagram of single-phase grounding fault of HV Y/Y transformer winding at valve side

外,换流站交流系统因操作或故障等原因在交流母线上产生的相间操作过电压,也会通过换流变压器绕组感应到换流变阀侧,在换流阀上产生较高的过电压,阀避雷器 V3 的过电压和能量则主要由该故障决定。

由图 1 所示的换流站避雷器布置图可知,高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组由避雷器 A2 直接保护。当准东站作为逆变站,即功率反送运行时,由于交流开关控制保护故障或其他原因造成偷跳闸,会发生逆变侧准东换流站失去交流电源的事故,故障简化示意如图 3 所示。可见,故障后直流线路储存的能量通过换流阀和换流变源源不断地注入交流侧,而交流侧由于存在交流滤波器和电容器等储能元件,与换流变压器等值电抗共同作用,在交流侧设备上产生电磁振荡过程,从而在换流站交、直流侧均会引起很高的过电压,该故障工况主要决定了避雷器 A2 的过电压和能量。

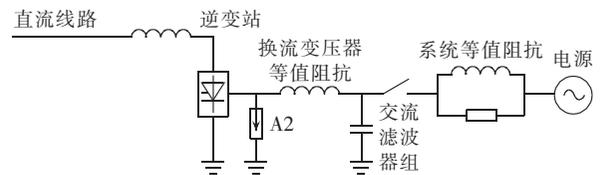


图 3 逆变侧失交流电源故障简化示意  
Fig.3 Schematic diagram of AC power loss at inverter side

根据换流站避雷器布置可知,换流器上 12 脉动换流单元由并联在其两端的避雷器 C2 直接进行保护,12 脉动换流单元中间母线由避雷器 C1 直接保护,下 12 脉动换流器 6 脉动桥母线由避雷器 M 直接保护。当发生全电压起动故障时,会在避雷器 C1、C2 和 M 上产生较大过电压,全电压起动故障机理见 3.2 节。

### 3.2 直流场操作过电压

换流站直流极线平波电抗器线路侧的开关设备主要由直流极线避雷器 DL 和直流母线避雷器 DB 保护,两者共同用于限制直流开关场的雷电和操作冲击引起的过电压。当直流控制系统失灵或通信系统发生故障致使逆变站处于闭锁状态时,整流站以最小触发角解锁,这会在直流线路以及开关设备上产生全电压启动过电压,故障简化示意如图 4 所示。由于整流站以最小触发角解锁,因此直流线路的瞬间充电电压较高,而闭锁的逆变站相当于线路末端开路,直流充电电压传到线路末端,在线路末端呈现反射,从而在直流线路和设备上会产生很高的过电压。此外,当发生逆变站闭锁而旁通对未解锁事故时,由于逆变站闭锁,换流阀不能正常换相,原来导通的阀继续保持导通,交流侧电压将直接通到直流侧,从而在直流线路上振荡产生较大的过电压。

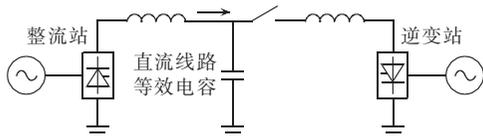


图 4 全电压启动简化示意

Fig.4 Schematic diagram of full voltage starting

中性母线平波电抗器阀侧的相关设备由避雷器 E1H 保护。其主要用于限制线路或阀厅内接地故障引起的各种操作冲击,需承受很大的能量,通常安装在阀厅外。过电压计算表明,在各种接地故障中,决定该避雷器最大过电压和能量的故障工况为高压端 Y/Y 换流变与换流阀之间发生接地短路,故障简化如图 2 所示,阀厅内其他接地故障下该避雷器承受的能量较小。

平波电抗器线路侧的各种开关设备主要由中性母线高能量避雷器 E2H 和中性母线避雷器 E2 共同保护,其中避雷器 E2H 为高能量避雷器,主要用于吸收系统各种运行方式下直流线路或阀厅内接地故障引起的操作冲击能量,而避雷器 E2 则主要用于限制窜入中性母线的雷电冲击。决定避雷器 E2H 的最大过电压和能量的故障工况为高压端 Y/Y 换流变与换流阀之间发生接地短路。

综上所述,在换流站直流侧设备上产生严重操作过电压的典型故障工况有:高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地、低压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地、交流侧相间操作冲击、逆变侧失交流电源、全电压启动和逆变站闭锁而旁通对未解锁事故。

## 4 直流操作过电压仿真计算

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建准东—四川  $\pm 1100$  kV 特高压直流输电系统模型,分别对上述

各种典型故障工况在准东换流站设备上产生的过电压进行仿真计算。

### 4.1 高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地

根据前文过电压分析可知,换流站高压端 Y/Y 换流变阀侧发生单相接地故障时,会在阀避雷器 V1 和中性母线避雷器 E1H、E2H 上产生较大过电压。

直流系统以完整双极平衡方式运行,功率正送时,高压端换流变 Y/Y 阀侧发生单相接地故障,在阀避雷器 V1 上产生的过电压最大。故障发生后,直流差动保护动作,故障极紧急停运,立即移相、闭锁,同时向逆变侧发出闭锁信号。在 1 个工频周期内找出避雷器承受最大能量的时刻,表 4 列出了该故障下的计算结果,换流阀两端最大过电压为 539 kV,避雷器 V1 通过的最大能量达 14.90 MJ。阀避雷器 V1 上的过电压波形和能量积累如图 5 所示。

表 4 高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地计算结果  
Tab.4 Calculated results for single-phase grounding fault of HV Y/Y transformer winding at valve side

避雷器	最大电压/kV	最大电流/kA	最大能量/MJ
V1	539	3.620	14.90
E1H	427	6.474	19.44
E2H	381	5.930	26.96

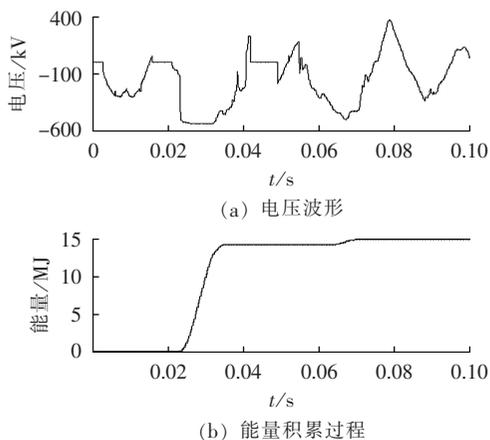


图 5 高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地时避雷器 V1 电压和能量波形

Fig.5 Waveforms of voltage and energy of arrester V1 during single-phase grounding fault of HV Y/Y transformer winding at valve side

直流系统单极金属回线运行,功率正送时,高压端换流变 Y/Y 阀侧发生单相接地故障,在换流站中性母线上产生的过电压最大。故障发生后,直流极线和金属回线上储存的能量主要通过中性母线高能量避雷器 E1H 和 E2H 释放,在 1 个工频周期内分别找出避雷器承受最大能量的时刻,计算结果如表 4 所示,中性母线平波电抗器阀侧最大过电压为 427 kV,避雷器 E1H 通过的最大能量为 19.44 MJ;中性母线平波电抗器线路侧的最大过电压为 381 kV,避雷器 E2H 通过的最大能量为 26.96 MJ。其中,中性母线

平抗阀侧高能量避雷器 E1H 上的过电压波形和能量积累如图 6 所示。

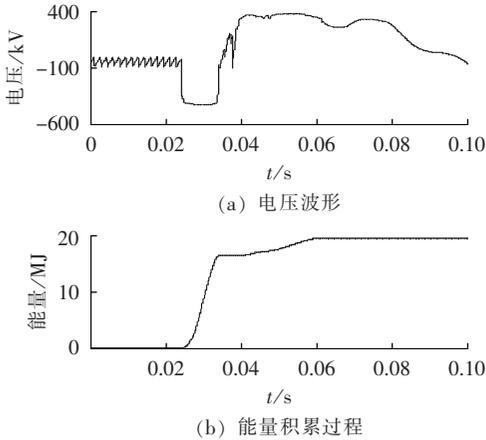


图 6 高压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地时避雷器 E1H 电压和能量波形

Fig.6 Waveforms of voltage and energy of arrester E1H during single-phase grounding fault of HV Y/Y transformer winding at valve side

#### 4.2 低压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地

阀避雷器 V2 的决定性故障为直流系统 1/2 双极不平衡运行方式下(如极 I 下 12 脉动换流器单独运行,极 II 双 12 脉动换流器运行),极 I 低压端 Y/Y 换流变与换流阀之间发生接地短路。故障发生后,直流差动保护动作,故障极紧急停运,立即移相、闭锁,同时向逆变侧发出闭锁信号。表 5 列出了该故障下的计算结果,换流阀两端最大过电压为 541 kV,避雷器 V2 通过的最大能量达 6.38 MJ。

表 5 低压端 Y/Y 换流变阀侧绕组单相接地计算结果

Tab.5 Calculated results for single-phase grounding fault of LV Y/Y transformer winding at valve side

避雷器	最大电压/kV	最大电流/kA	最大能量/MJ
V2	541	1.799	6.38

#### 4.3 交流侧相间操作冲击

避雷器 V3 的决定性故障为交流相间操作冲击,而交流操作过电压的幅值主要由换流变一次侧交流母线避雷器 A 的保护水平决定。根据避雷器参数可知,该工程避雷器 A 的保护水平为 1106 kV,从严考虑相间操作过电压幅值可取为相对地过电压的 1.7 倍<sup>[29]</sup>,即 1880 kV。仿真计算结果如表 6 所示,换流阀两端最大过电压为 523 kV,避雷器 V3 通过的最大能量为 0.145 MJ。阀避雷器 V3 的过电压波形和能量积累如图 7 所示。

表 6 交流侧相间操作冲击计算结果

Tab.6 Calculated results for phase-to-phase switching surge at AC side

避雷器	最大电压/kV	最大电流/kA	最大能量/MJ
V3	523	0.310	0.145

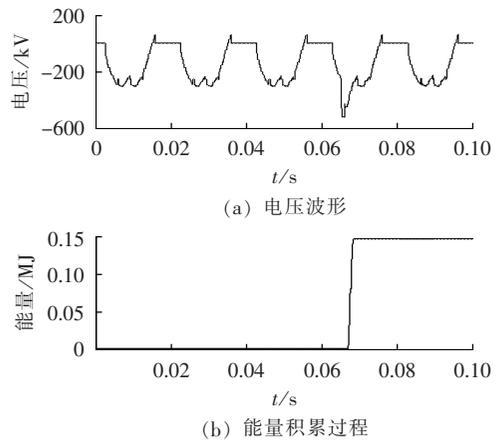


图 7 交流侧相间操作冲击下避雷器 V3 电压和能量波形

Fig.7 Waveforms of voltage and energy of arrester V3 during phase-to-phase switching surge at AC side

#### 4.4 逆变侧失交流电源

当准东站作为逆变站运行,即功率反送,发生逆变站失交流电源故障时,直流侧的能量通过换流阀和换流变注入交流侧,会在高压端 Y/Y 换流变阀侧产生较大过电压。仿真计算中,逆变侧失交流电源故障发生 40 ms 后,逆变站控制保护系统启动紧急停运,立即投入旁通对闭锁并向对站发出闭锁信号。计算结果如表 7 所示,可知该故障下在换流变阀侧交流线路上产生较大过电压。避雷器 A2 的过电压和能量积累如图 8 所示。

表 7 逆变侧失交流电源计算结果

Tab.7 Calculated results for AC power loss at inverter side

避雷器	最大电压/kV	最大电流/kA	最大能量/MJ
A2	1767	0.634	2.23

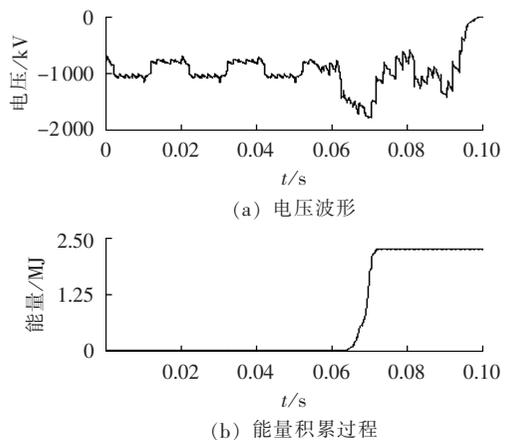


图 8 逆变侧失交流电源时避雷器 A2 电压和能量波形

Fig.8 Waveforms of voltage and energy of arrester A2 during AC power loss at inverter side

#### 4.5 全电压起动

由第 3 节分析知,当发生全电压起动故障时会在 DB、DL、C1、C2 和 M 等避雷器上产生较大过电压。计算准东换流站相关避雷器最大过电压时,采取功

率正送的方式,准东站以最小触发角解锁,逆变站成都站开路,计算结果如表8所示。

表8 全电压起动的计算结果

Tab.8 Calculated results for full voltage starting

避雷器	最大电压/kV	最大电流/kA	最大能量/MJ
DB	1 822	0.679	14.96
DL	1 822	0.679	14.96
C1	889	0.100	0.68
C2	933	0.102	0.71
M	471	≈0	≈0

由表8计算结果可知,全电压启动时在准东换流站极线平波电抗器线路侧产生的最大过电压为1 822 kV,通过避雷器DB/DL的最大能量为14.96 MJ;加在上12脉动换流单元的最大过电压为933 kV,通过避雷器C2的最大能量为0.71 MJ;12脉动换流单元中间直流母线上的最大过电压为889 kV,通过C1的能量0.68 MJ;避雷器M几乎不动作,通过的能量可忽略不计。

#### 4.6 逆变侧闭锁而旁通对未解锁

当直流系统发生逆变侧闭锁而旁通对未解锁故障时,会在直流线路上产生较大过电压。表9列出了该故障下的计算结果,在直流极线上产生的最大过电压为1 852 kV,比全电压启动故障产生的过电压更大。

表9 逆变侧闭锁而旁通对未解锁故障计算结果

Tab.9 Calculated results for inverter blocking without by-pass de-blocking

避雷器	最大电压/kV	最大电流/kA	最大能量/MJ
DB/DL	1 852	1.059	2.67

## 5 结论

a. 在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建准东—四川±1 100 kV特高压直流输电系统模型,分别对各种典型故障在准东换流站设备上产生的最大过电压进行了仿真计算,得到了相应避雷器承受的最大过电压和能量。

b. 在换流阀两端产生的最大过电压为541 kV,其中高压端换流变Y/Y阀侧发生单相接地故障,阀避雷器V1承受的最大过电压和能量分别为539 kV和14.90 MJ;低压端换流变Y/Y阀侧发生单相接地故障时,阀避雷器V2承受的最大过电压和能量分别为541 kV和6.38 MJ;来自交流侧的相间操作冲击,在换流阀两端产生的最大过电压为523 kV,避雷器V3通过的最大能量0.145 MJ。

c. 中性母线平抗阀侧和线路侧的最大过电压分别为427 kV和381 kV,决定性故障均为高压端换流变Y/Y阀侧发生单相接地故障,避雷器E1H和E2H通过的最大能量分别为19.44 MJ和26.96 MJ。

d. 直流系统功率反送时,发生逆变站失交流电源故障,在准东换流站高压端Y/Y换流变阀侧产生最大过电压为1 767 kV,通过避雷器A2的最大能量为2.23 MJ。

e. 直流极线的最大过电压为1 852 kV,决定性故障为逆变侧闭锁而旁通对未解锁故障;通过避雷器DB/DL的最大能量为14.96 MJ,决定性故障为全电压启动。

#### 参考文献:

- [1] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.  
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22):1-7.
- [2] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):10-14,61.  
ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):10-14, 61.
- [3] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4):1-9.  
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4):1-9.
- [4] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31):1-6.
- [5] 范建斌,于永清,刘泽洪,等. ±800 kV特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术,2006,30(14):1-6.  
FAN Jianbin, YU Yongqing, LIU Zehong, et al. Introduction of ±800 kV HVDC transmission standard system[J]. Power System Technology, 2006, 30(14):1-6.
- [6] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ±800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术,2006,30(1):1-7.  
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1):1-7.
- [7] 汤广福. 高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J]. 电网技术,2012,36(1):1-6.  
TANG Guangfu. R&D and application of key technologies for HVDC equipment[J]. Power System Technology, 2012, 36(1):1-6.
- [8] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2009年)[M]. 北京:中国电力出版社,2011:234-339.
- [9] 张运洲,韩丰,赵彪,等. 直流电压等级序列的经济比较[J]. 电网技术,2008,32(9):37-41.  
ZHANG Yunzhou, HAN Feng, ZHAO Biao, et al. Economic comparison of HVDC voltage class sequence[J]. Power System Technology, 2008, 32(9):37-41.
- [10] 张文亮,周孝信,郭剑波,等. ±1000 kV特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):1-5.

- ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin,GUO Jianbo,et al. Feasibility of ±1000 kV ultra HVDC in the power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(28):1-5.
- [11] 刘泽洪,高理迎,余军,等. ±1000 kV 特高压直流输电技术研发思路[J]. 中国电机工程学报,2009,29(22):76-82.  
LIU Zehong,GAO Liying,YU Jun,et al. R&D ideas of ±1000 kV UHVDC transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(22):76-82.
- [12] 汤广福,刘泽洪. 2010 年国际大电网会议系列报道:高压直流输电和电力电子技术[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):1-4.  
TANG Guangfu,LIU Zehong. A review of CIGRE 2010 on HVDC transmission and power electronic technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5):1-4.
- [13] 费烨,王晓琪,汪本进,等. ±1000 kV 特高压直流互感器的选型与研制[J]. 高电压技术,2010,36(10):2380-2387.  
FEI Ye,WANG Xiaoqi,WANG Benjin,et al. Development on ±1000 kV UHVDC instrument transformer[J]. High Voltage Engineering,2010,36(10):2380-2387.
- [14] 丁玉剑,廖蔚明,孙昭英,等. ±1000 kV 直流输电线路塔头间隙冲击放电特性试验及海拔校正研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):156-162.  
DING Yujian,LIAO Weiming,SUN Zhaoying,et al. Experimental studies on impulse flashover characteristics of tower head air gaps of ±1000 kV DC transmission lines and altitude correction methods[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(34):156-162.
- [15] 许钊,周会高,刘朴,等. ±1100 kV 特高压直流输电晶闸管阀运行试验系统设计[J]. 高电压技术,2012,38(2):400-406.  
XU Fan,ZHOU Huigao,LIU Pu,et al. Design for ±1100 kV UHVDC thyristor valve operational test circuit[J]. High Voltage Engineering,2012,38(2):400-406.
- [16] 张学成,檀金华,牛万宇,等. ±1100 kV 直流输电工程换流变压器阀侧套管的设计[J]. 高电压技术,2012,38(2):393-399.  
ZHANG Xuecheng,TAN Jinhua,NIU Wanyu,et al. Bushings design of converter transformer's valve side of UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering,2012,38(2):393-399.
- [17] 周浩,王东举. ±1100 kV 特高压直流换流站过电压保护和绝缘配合[J]. 电网技术,2012,36(2):1-8.  
ZHOU Hao,WANG Dongju. Overvoltage protection and insulation coordination for ±1100 kV UHVDC converter station[J]. Power System Technology,2012,36(2):1-8.
- [18] 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.
- [19] 陈锡磊,周浩,袁士超,等. 天生桥—广州直流系统换流阀过电压机制研究[J]. 电网技术,2012,36(3):88-94.  
CHEN Xilei,ZHOU Hao,YUAN Shichao,et al. Overvoltage mechanism of converter valves for HVDC power transmission project from Tianshengqiao to Guangdong[J]. Power System Technology,2012,36(3):88-94.
- [20] 袁士超,王东举,陈锡磊,等. 天广直流系统中性母线过电压机制研究[J]. 电网技术,2011,35(5):216-222.  
YUAN Shichao,WANG Dongju,CHEN Xilei,et al. Study on neutral-bus overvoltage mechanism of ±500 kV DC power transmission project from Tianshengqiao to Guangdong[J]. Power System Technology,2011,35(5):216-222.
- [21] 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.
- [22] 张赞,殷威扬,聂定珍,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.  
ZHANG Yun,YIN Weiyang,NIE Dingzhen,et al. Overvoltage and insulation coordination of ±660 kV HVDC transmission project[J]. Electric Power Construction,2011,32(8):54-57.
- [23] 王东举,邓旭,周浩,等. ±800 kV 溪洛渡—浙西直流输电工程换流站直流暂态过电压[J]. 南方电网技术,2012,6(2):6-13.  
WANG Dongju,DENG Xu,ZHOU Hao,et al. On the DC transient overvoltage in the converter stations of ±800 kV Xiluodu-Zhexi HVDC project[J]. Southern Power System Technology,2012,6(2):6-13.
- [24] 陈锡磊,周浩,王东举,等. ±800 kV 浙西特高压直流换流站暂态过电压研究[J]. 电网技术,2012,36(3):22-27.  
CHEN Xilei,ZHOU Hao,WANG Dongju,et al. Study on transient overvoltage of Zhexi converter station of ±800 kV DC power transmission project[J]. Power System Technology,2012,36(3):22-27.
- [25] 安萍,苟锐峰,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.
- [26] 周浩,陈锡磊,陈润辉,等. ±800 kV 特高压直流换流站绝缘配合方案分析[J]. 电网技术,2011,35(11):18-24.  
ZHOU Hao,CHEN Xilei,CHEN Runhui,et al. Analysis on insulation coordination scheme for ±800 kV DC converter station[J]. Power System Technology,2011,35(11):18-24.
- [27] 廖志超,苟锐峰,程晓绚,等. ±800 kV 直流换流站三种不同类型避雷器性能比较[J]. 南方电网技术,2010,4(2):63-66.  
LIAO Zhichao,GOU Ruifeng,CHENG Xiaoxun,et al. Performance comparison of three different types of arresters at ±800 kV DC converter station[J]. Southern Power System Technology,2010,4(2):63-66.
- [28] HAEUSLER M,RETZMAN D. 特高压直流输电设备设计综述[J]. 南方电网技术,2008,2(4):1-7.  
HAEUSLER M,RETZMAN D. Review on UHVDC equipment design aspects[J]. Southern Power System Technology,2008,2(4):1-7.
- [29] 中华人民共和国电力工业部. DL/T620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:出版者不详,1997.

#### 作者简介:



邓旭

邓旭(1990-),男,湖南永州人,硕士研究生,研究方向为高压、特高压直流输电的过电压与绝缘配合(E-mail:dengxu926@163.com);

王东举(1984-),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事电力系统过电压方面的研究工作;

周浩(1963-),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统过电压、直流输电等方面的研究工作(E-mail:zhouhao\_ee@zju.edu.cn)。

(下转第 167 页 continued on page 167)

电液伺服系统自适应控制研究[J]. 机床与液压,2006(4): 167-169.

YAO Jianjun,WU Zhenshun,YUE Donghai,et al. Adaptive control of electro-hydraulic servo system with dead-zone nonlinearity based on Popov criterion[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2006(4):167-169.

[17] BINA M T,BHAT A K S. Averaging technique for the modeling of STATCOM and active filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(2):723-734.

[18] 吴广玉. 系统辨识与自适应控制[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987:59-74.

#### 作者简介:



徐长波

李春文(1958-),男,河南焦作人,教授,博士研究生导师,研究方向为非线性系统分析与控制、电力系统控制及运动控制等。

徐长波(1982-),男,山东聊城人,博士,研究方向为电能质量谐波治理与非线性控制策略的应用(E-mail:xcbo7@mails.tsinghua.edu.cn);

鲁伟(1987-),男,安徽界首人,博士,研究方向为电力系统非线性控制及电能质量分析与治理;

## Application of adaptive control based on hyperstability theory in single-phase active power filter

XU Changbo,LU Wei,LI Chunwen

(Department of Automation,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

**Abstract:** In order to suppress the influence of filtering parameters on the compensation effect of single-phase APF(Active Power Filter),a model-following control strategy based on the hyperstability theory is proposed. The nonlinear APF model is linearized and equaled to a combined model of a feedforward loop and a feedback loop. The control law of adaptive modelfollowing model is designed according to the hyperstability theory,which makes the feedback loop satisfying with Popov integral inequality and the transfer function of feedforward loop strictly positive real. Simulative results show that,compared to PI control,the proposed control strategy eliminates the grid harmonic current more effectively and suffers less from filtering parameters,with better compensation effect.

**Key words:** active filters; model following; hyperstability theory; Popov integral inequality; strictly positive real; adaptive control systems; compensation

(上接第 147 页 continued from page 147)

## DC switching overvoltage of $\pm 1100$ kV UHVDC converter station

DENG Xu<sup>1</sup>,WANG Dongju<sup>1</sup>,SHEN Yang<sup>2</sup>,ZHOU Hao<sup>1</sup>,CHEN Xilei<sup>3</sup>,SUN Ke<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310014, China;

3. Zhejiang Cixi Power Supply Bureau, Cixi 315300, China;

4. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The mechanism of switching overvoltage occurred in the valve hall and DC switchyard of  $\pm 1100$  kV UHVDC converter station is analyzed based on Zhundong-Sichuan  $\pm 1100$  kV UHVDC power transmission project. Different faults are simulated,such as the grounding fault of HV winding of Y/Y converter transformer at valve side,the grounding fault of LV winding of Y/Y converter transformer at valve side,the phase-to-phase switching surge at AC side,the AC power loss at inverter side,the full-voltage starting,the inverter blocking without by-pass de-blocking,and the corresponding overvoltages exerted on the equipments of converter station are calculated,which provide the reference for the type selection,test and insulation coordination of station equipments.

**Key words:** UHV power transmission; DC power transmission; converter station; arrester; switching overvoltage; energy