

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.01.018

±1 100 kV 直流滤波器典型故障过电压特性研究

吴钰颖, 郭洁

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:为了研究±1 100 kV 直流滤波器典型故障过电压的特点及其相应的保护措施, 针对±1 100 kV 昌吉—古泉直流输电工程, 利用 PSCAD 计算并分析了双极全压运行方式、单极大地回线和单极金属回线运行方式下直流滤波器短路、滤波器高低压电容器组分别击穿等滤波器典型故障产生的过电压及其暂态特性, 并在最具代表性的故障情况下, 研究了避雷器对过电压特性的影响。基于此, 进一步研究了保护控制策略对过电压与能量的影响。结果表明, 整流侧发生直流滤波器短路故障时, 过电压更为严重; 单极金属回线下发生直流滤波器短路故障时, 过电压更为严重且避雷器吸收能量过大; 增设避雷器与保护控制后, 关键节点的过电压值均低于该处的绝缘水平, 避雷器吸收的能量也未超过其吸收能力。

关键词:特高压直流输电; 运行方式; 直流滤波器; 暂态过电压; 保护控制策略; PSCAD

中图分类号: TM864

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)01-0130-08

0 引言

我国能源和电力负荷分布极不均衡的现状奠定了我国电力流向的基本格局——“西电东送, 南北互供”, 而超特高压直流输电以其输电容量大、适合远距离传输等优点成为跨区域输电首选^[1]。目前我国已经建设了多条不同电压等级的长距离直流输电线路。随着我国电力工业的迅速发展, 出现了距离超过 3 000 km 的输电需求, 若依然采用现有的±800 kV 电压等级, 输电损耗将超过 10%, 无法满足高效经济的要求, 因此提出了更高电压等级的±1 100 kV 直流输电。

在特高压直流系统运行中, 由换流器引起的谐波电流不但会危害交、直流系统本身, 而且严重影响系统各设备的正常工作并产生强烈的电磁干扰, 影响直流线路和接地极线路走廊附近的通信^[2-3]。因此, 一般具有架空线路的直流工程都配置直流滤波器, 以此有效降低直流系统的谐波分量。

由于±1 100 kV 直流工程的运行电压更高, 相应的过电压水平和过电压机理也更复杂。现有文献[4—8]主要针对直流滤波器的设计和配置进行了方案研究, 仅从直流滤波器滤波性能的角度进行分析, 并未讨论直流滤波器的故障过电压水平; 文献[9—13]对直流滤波器内高压电容器故障进行了分析, 并着重提出了高压电容器组不平衡电流保护策略, 然而并未涉及其他决定直流滤波器暂态应力

的故障情况; 文献[14—18]对±800 kV 系统下直流滤波器设备暂态定值进行了计算, 并确定了滤波器避雷器参数; 文献[19]研究了±1 100 kV 直流滤波器过电压与绝缘配合, 但是其各种分析仅仅针对独立的滤波器本身, 基于整个系统对直流滤波器典型故障下的暂态特性及防护能量研究较少。

因此, 文中立足于整个±1 100 kV 直流系统, 对直流滤波器几种典型故障下的暂态特性及防护配置进行深入研究, 为其保护控制、绝缘配合提供参数和依据^[20-23]。依据直流滤波器运行特点, 文中以±1 100 kV 昌吉—古泉直流系统为背景, 采用了 PSCAD / EMTDC 软件建立仿真模型, 计算研究直流滤波器典型故障下的过电压特性, 计算避雷器对滤波器过电压的影响, 研究整流侧与逆变侧故障的暂态特性的不同, 并在不同运行方式下进行过电压对比研究。在此基础上, 进一步研究闭锁控制策略对滤波器过电压和避雷器吸收能量的影响。据此提出±1 100 kV 直流输电系统中直流滤波器保护控制的工程建议。

1 仿真计算条件

1.1 系统运行条件

±1 100 kV 昌吉—古泉特高压直流工程采用整流侧定电流、逆变侧定电压的控制策略, 每站每极由 2 个 12 脉动换流器串联组成。送端换流器网侧接入 750 kV 交流电网; 受端采用分层接入, 即高端换流器接入 500 kV 交流电网, 低端换流器则接入 1 000 kV 交流电网。每站单极极线和中性母线各配 2 支平波电抗器, 线路长度约为 3 324.15 km。

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-08-13

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5210EF1800-0S)

±1 100 kV 昌吉—古泉直流工程双极两端中性点接地方式电气主接线如图 1 所示,利用正负两极导线和两端换流站的正负两极相连构成直流侧的闭环回路。

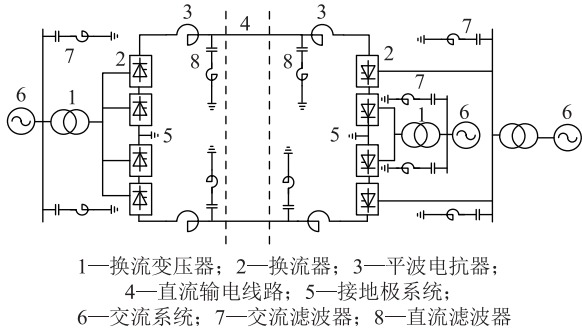


图 1 ±1 100 kV 昌吉—古泉直流工程电气主接线
Fig.1 Main connection scheme of ±1 100 kV Changji—Guquan UHVDC project

1.2 直流滤波器模型

每站每极配置一组由调谐频率为 2/12 次的滤波支路 (HP2/12) 并联组成的双调谐直流滤波器 (如图 2 所示),参数见表 1,δ 为电容损耗角。考虑换流站两极对称,因此两极配置相同的直流滤波器,滤波器通过隔离开关分别与极线和中性母线相连。2 次、12 次调谐频率主要为了抑制直流侧的 2 次谐振和换流器产生的特征谐波,降低极线的谐波水平。

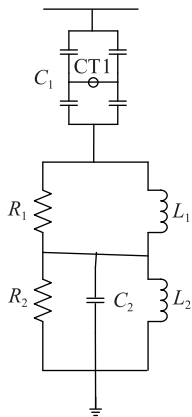


图 2 HP2/12 双调谐直流滤波器示意
Fig.2 Diagram of HP2/12 dual-tuning DC filter

表 1 双调谐直流滤波器元件参数

Table 1 Parameters of dual tuned DC filter

参数	数值	参数	数值
调谐频率/Hz	100/600	R ₁ /Ω	4 130
C ₁ /μF	0.6	R ₂ /Ω	9 560
L ₁ /mH	408.4	品质因数	100
C ₂ /μF	0.267	tanδ	0.000 2
L ₂ /mH	2 719.7		

2 双极运行方式下直流滤波器故障过电压

直流滤波器作为直流输电系统中的重要设备之一,当其出现故障时就会对滤波器甚至整个系统产生影响。直流滤波器可能出现的典型故障有:直流滤波器短路故障、直流滤波器低压电容器 C₂ 故障、直流滤波器高压电容器组 C₁ 故障。

2.1 直流滤波器短路故障

稳态运行下直流滤波器高压电容充电至+1 100 kV,当直流滤波器短路故障发生的瞬间,此时故障点电压由+1 100 kV 下降至零。即相当于有一幅值为-1 100 kV 的电压行波,沿着直流线路从故障点向两侧换流站同时传播,并且会产生相应的故障电流波。此外,由于极线间存在电磁耦合作用,会在健全极线路上产生相应的感应电流,此电流会对健全极上的对地电容进行充电,形成过电压。

当整流站发生故障时候,交流系统通过换流阀中导通的元件传递的能量以及换流器存储的电磁能、电场能会迅速转换为流经接地点的故障电流,故障电流会通过直流滤波器、接地极及故障点构成故障回路,同时也会经过平抗、换流器以及换流站接地网形成回路,如图 3 所示。C₁ 和 L₁ 主要承受故障发生瞬间产生的陡波过电压,同时,由于 C₁ 和 L₁ 的阻尼作用,低压端设备 L₂, C₂ 基本不承受陡波过电压,主要承受由滤波器电感和电容的电磁暂态振荡而产生的操作过电压。换流站内设备描述如表 2 所示。

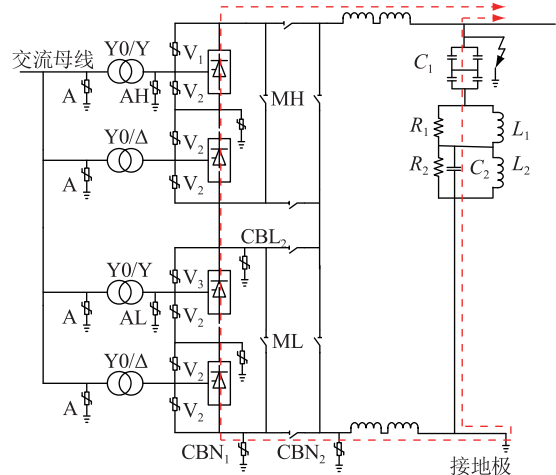


图 3 故障电流回路

Fig.3 Diagram of fault current loop

故障时关键节点过电压见表 3 中整流侧计算结果,以稳态运行时各元件的工作电压为 1.0 p.u. 进行计算。故障瞬间会在滤波器内部 C₂, L₁, L₂ 这些低压设备上产生很大的瞬时过电压,由于低压设备正

表 2 换流站内设备描述

Table 2 Definition of the equipment in converter stations

避雷器型号	中文名称
A	交流母线避雷器
V_1, V_2, V_3	阀避雷器
AH, AL	上/下 12 脉动高端 YY 换流变阀侧避雷器
MH, ML	上/下 6 脉动桥避雷器
CBL_2	12 脉动桥避雷器
CBN_1, CBN_2	换流阀低压端避雷器

常工作时承压很小,因此过高的过电压倍数会使得这些元件的绝缘遭受破坏。而在中性母线平抗和直流极线平抗都串联在故障电流回路中,电流的上升和下降都会在中性母线上产生较高的过电压。

仿真得到故障电流波形如图 4 所示,电流上升时间约 15 ms,最大峰值约为 25.283 kA,故障电流会持续保持较高值,影响特高压直流运行。

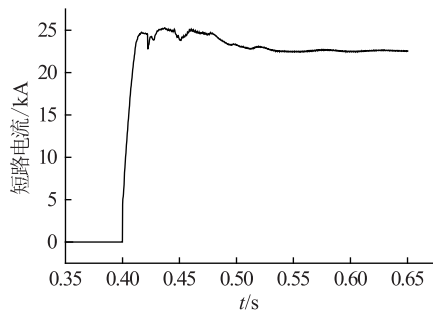


图 4 直流滤波器短路故障电流波形

Fig.4 Current waveform of DC filter short-circuit fault

当直流滤波器短路故障发生在逆变站时,故障过电压较整流侧小得多,表 3 中进行了对比,其原因主要有两点:一是整流站将交流系统能量传送到直流侧,而逆变站将直流系统能量传回交流侧,逆变站电流方向与整流站电流方向相反,发生故障时,故障电流更小;二是逆变侧直流电压较整流侧直流电压低 50 kV 左右,使得逆变器存储的能量比整流侧小,因此发生接地故障后故障电流也更小,故障回路与整流侧类似,电流上升时间在 3 ms 左右,最大峰值约为 9.120 kA,相比于整流侧,逆变侧故障时的电流波头更陡而波尾更缓。

表 3 整流侧与逆变侧的故障过电压

Table 3 Fault overvoltage on rectifier side and inverter side

位置	整流侧过电压/kV	逆变侧过电压/kV
C_1	602.060	570.307
$C_2/R_2/L_2$	947.306	904.179
L_1/R_1	774.439	748.525
平波电抗器	383.970	361.850
健全极	1 340.358	1 265.821

2.2 直流滤波器高压电容器组 C_1 故障

直流滤波器元件中最主要的是高压电容器组 C_1 ,其既需要承受直流线路的直流电压和较小分量的工频交流电压,还需要承受谐波电压,一旦 C_1 内部出现故障,其他正常的电容元件将会承受高压,可能引发雪崩效应。±1 100 kV 直流输电工程中的直流滤波器高压电容器组 C_1 采用 H 型接线形式,如图 2 所示。当 H 型接线中相对位置不同的支路发生故障时,过电压水平及形成机理也不同。

(1) H 型接线中单个支路电容器击穿或并联的两支路电容器同时击穿。当 H 型接线中单个支路电容器击穿或相并联的两支路电容器同时击穿时,相当于高压电容器组整体的电容值在这一瞬间发生了改变,其内部的电磁能量会在完好的元件上重新分配,导致滤波器内部产生过电压和过电流。但由于这个过程仅在滤波器内部发生且持续时间较短,因此产生的过电压幅值小,基本不会对整个系统运行造成影响。但是并联 2 个支路电容器故障较单个支路电容器故障时的电压峰值低,因为并联支路电容器击穿时,电流互感器 CT1 所在支路上的不平衡电流小于单个支路电容击穿,对完好元件的影响小于单个支路,计算结果见表 4。

表 4 直流滤波器中 C_1 故障过电压

Table 4 Fault overvoltage of C_1 in DC filter

位置	单个支路/kV	并联两支路/kV	串联两支路/kV
C_1	1 496.697	1 405.878	故障
C_2/L_2	591.356	466.464	1 281.194
L_1	409.525	326.883	757.645
健全极	1 057.572	1 049.826	1 124.621
平抗	59.449	53.217	94.483

(2) H 型接线中串联的两支路电容器同时击穿。当 H 型接线中相串联的两支路电容器同时击穿时,可等效看作电容器组 C_1 整个发生了击穿。直流侧主要含有直流分量及很少的谐波分量,而滤波器中的 L_1 与 L_2 在直流分量下阻抗为 0,当 C_1 击穿时,故障可等效为直流极线接地。交流系统传递到直流侧的电能以及换流器存储的电磁场能量转换为故障电流,故障电流流过直流滤波器和接地极,同时也会通过换流器以及换流站接地网形成回路,故障回路如图 5 所示。

2.3 直流滤波器低压电容器 C_2 故障

当直流滤波器低压电容器发生击穿时对系统造成的影响微乎其微,因为当滤波器正常运行时, C_2 其本身承担的电压很小,可近似看作短路,当 C_2 发生击穿时不会导致滤波器和系统各节点能量重

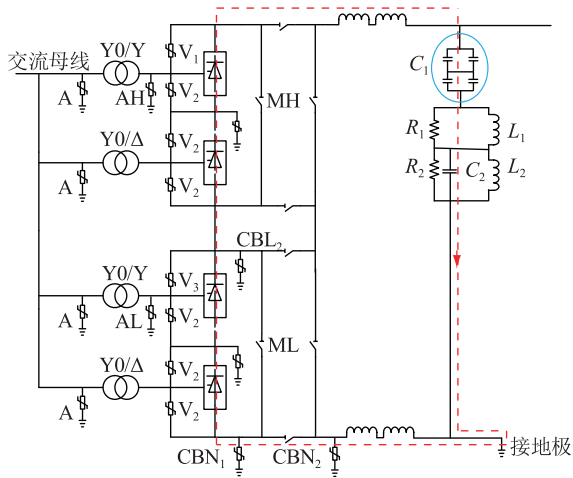


图5 故障电流回路

Fig.5 Diagram of fault current loop

新分配从而产生过电压和过电流。

对比表 3 与表 4 可明显看出,直流滤波器短路和 C_1 中相串联 2 个支路电容器故障情况更加严重,综合考虑过电压形成机理和故障发生概率,直流滤波器短路故障研究更具有代表性。

3 其他运行方式下直流滤波器短路过电压

大多数直流输电工程都采用双极两端中性点接地方式,双极中的任一极均能构成一个独立运行的单极输电系统,提高了系统的稳定性和可靠性。但当输电线路或换流站的一个极发生故障需退出工作时,系统可转化为单极大地回线方式或单极金属回线方式。

3.1 单极大地回线

双极运行实际上由 2 个独立运行的单极大地回路系统构成,因此在单极大地回线运行方式下,由于整流站中性母线直接与接地极连接,大部分故障电流流经中性线和接地极形成回路,与双极运行类似。当单极大地回线下直流滤波器发生短路故障时产生的过电压幅值、持续时间以及避雷器吸收的能量都与双极方式下基本一致,如表 5 所示。

表 5 不同运行方式下的故障过电压

Table 5 Fault overvoltage in different operating modes

位置	双极下/kV	单极大地/kV	单极金属/kV
C_1	602.060	610.732	2 113.696
$C_2/R_2/L_2/F_2$	947.306	962.973	918.609
$L_1/R_1/F_1$	774.439	788.973	786.769
平抗	383.970	371.530	363.067
健全极	1 340.358		

3.2 单极金属回线

当单极金属回线运行方式下发生直流滤波器

短路故障时,过电压情况会更加严重,如表 4 所示。最根本的原因是因为单极金属回线下,整流站中性母线经转换开关连接金属回线,不与接地极相连。其次,在单极金属回线下,金属回线上存储的能量需要释放的过程,所以将产生更大的故障电流。而单极大地和双极运行方式下,整流站接地,大地的土壤电阻率远高于金属回线电阻率,因此故障电流也远小于单极金属方式下的故障电流。

4 直流滤波器保护配置

4.1 增设避雷器后故障过电压

直流滤波器避雷器具有其特殊的配置原则。在直流侧,滤波器高压电容器与直流母线直接相连,因其自身具有耐受一定过电压和隔离一定过电压的作用,系统侧产生的过电压不易传到高压电容器以下的低压设备,所以一般不需配置专门的避雷器。但低压设备和高压电容器直接串联,如果滤波器两端短路,高压电容器就会直接对低压电感和电阻放电,形成过电压,因此需对低压设备配置专门的避雷器^[24-25]。

± 100 kV 特高压直流工程对于直流滤波器避雷器的通流容量要求更大,因此考虑采用多柱式避雷器并联以满足对较高能量吸收能力的要求。其配置参数见表 6,配置方式如图 6 所示。

表 6 直流滤波器避雷器配置参数

Table 6 Parameters of DC filter arresters

换流站	避雷器	最大持续运行电压(峰值)/kV	标称放电电流/kA	残压/kV
昌吉站	F_1	259.89	26	930
	F_2	509.89	10	1 023
	F_3	640.79	48	1 306
古泉站	F_1	259.89	26	930
	F_2	509.89	10	1 023
	F_3	640.79	48	1 306

双极运行方式下,当直流输电系统整流侧发生直流滤波器短路故障时,交流系统通过换流阀传递的能量以及换流器中存储的电磁能、电场能会迅速转换为流经接地点的故障电流,故障电流回路如图 3 所示。故障时,滤波器的避雷器仅对故障滤波支路内部各元件暂态过电压幅值有抑制效果,其中,避雷器对 L_1 的过电压抑制效果最明显(如表 7 所示),但对故障持续的时间和频率作用不明显。就整个系统而言,滤波器内部的避雷器对系统其他关键节点的暂态电压和电流影响很小。避雷器节点的过电压和吸收能量的计算结果如表 8 所示。 C_1 会

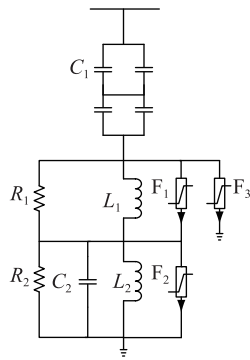


图 6 直流滤波器及避雷器配置示意

Fig.6 Diagram of configuration of DC filter and arresters

承受故障瞬间的陡波过电压,结合图 3 的故障电流回路可知,故障时 C_1 会对滤波器中的低压设备放电,由于 F_1 与 L_1 相并联, F_2 与 L_2 相并联,电感上储存的能量会直接被避雷器 F_1 、 F_2 吸收。除此之外, F_3 主要吸收高压电容器 C_1 上的能量,但直流滤波器短路故障时 C_1 上并未出现过电压,因此综合来看 F_1 和 F_2 吸收的能量比 F_3 大。 F_1 吸收的能量波形如图 7 所示,吸收能量随着故障电流的上升而增加,故障过程中,避雷器吸收能量约 31.701 kJ。

表 7 增设避雷器后故障过电压计算结果

Table 7 Fault overvoltage calculation results after adding arrester

位置	抑制前过电压/kV	抑制后过电压/kV	抑制量/%
C_1	602.06	575.36	4.434
$C_2/R_2/L_2/F_2$	947.31	783.95	17.245
$L_1/R_1/F_1$	774.44	551.14	28.834

表 8 滤波器内避雷器上的过电压计算结果

Table 8 Overvoltage calculation results of the arrester in the filter

参数	F_1	F_2	F_3
电压峰值/kV	551.14	783.95	902.99
最大电流峰值/kA	1.197×10^{-5}	0.077	0.033
最大能量/kJ	31.701	14.297	6.535

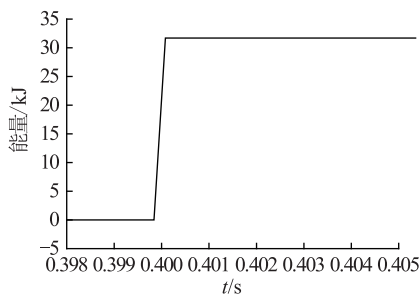


图 7 避雷器 F_1 能量波形

Fig.7 Energy waveform diagram of arrester F_1

4.2 增设保护控制策略后的故障过电压

在直流滤波器短路故障中,增添避雷器仅能够降低过电压幅值,但在故障后,交流侧的能量仍能够继续传递到直流侧,因此需要更进一步研究直流滤波器的控制保护策略。目前直流系统的控制保护策略依赖于换流阀的调节,直接影响电磁能量的转换过程,在故障发生后立即做出相应的保护动作,可以减短故障时间,缩小故障范围,从而保护换流设备,降低损失。

由于没有直流断路器,因此当直流滤波器短路时,接地点形成电弧,电弧电流为直流难以熄灭。如果故障发生在整流侧,故障后整流侧的交流能量仍能够通过换流变和换流阀继续进行传递,电弧电流将维持得更久。因此故障时,启动闭锁控制,先将整流器移相至 120° ,使其工作在逆变状态,将能量反送至交流侧,减小故障电流,再发送 ESOF(直流输电系统紧急停运信号)至极控,拉开中性母线开关和直流线路隔离开关,最后跳开交流侧开关。

图 8 为利用逻辑时序元件在 PSCAD 中建立的整流侧闭锁控制模型。通过设置比较器,改变闭锁信号的发出时间。当闭锁信号发出,这一时刻的触发角被采样保持,并以 $100 \pi/s$ 的速度从额定值 15° 移相至 120° ,移相完成后,换流阀闭锁,经一定延时断开交流断路器。

双极运行方式下,整流侧直流滤波器短路时,滤波器高压端电位瞬间被拉低,直流滤波器两端电位被钳制。因此启动保护控制策略不能改变暂态过电压,仅能通过停止换流阀的能量传输,使交流侧电能停止向直流侧传递,并将直流侧多余电能反送回交流侧,以限制滤波器的内部能量。对比图 4 和图 9,加入保护控制前后的故障电流,后者最大幅值约减小 60%,暂态持续响应约 150 ms。

单极大地和双极运行方式整流侧直接接地致使避雷器本身吸收的能量不大,且避雷器吸收能连给的主阶段会在启动保护控制之前完成,所以此运行方式下保护控制影响较小。但对于单极金属回线方式而言,由于整流站不直接与接地极相连,故障电流只能通过避雷器 F_3 形成回路。因此,该方式下,将有更多故障电流经避雷器形成回路,故障接地电流幅值高且持续时间长,导致 F_3 持续吸收能量,吸收的能量过大,十分危险。因此加入保护控制策略限制直流侧能量后,单极金属方式下避雷器吸收能量的变化最为明显,见表 9。

根据文献 [18] 的研究结果和相关国标规定^[26],±1 100 kV 直流工程的直流滤波器 C_1 高压端

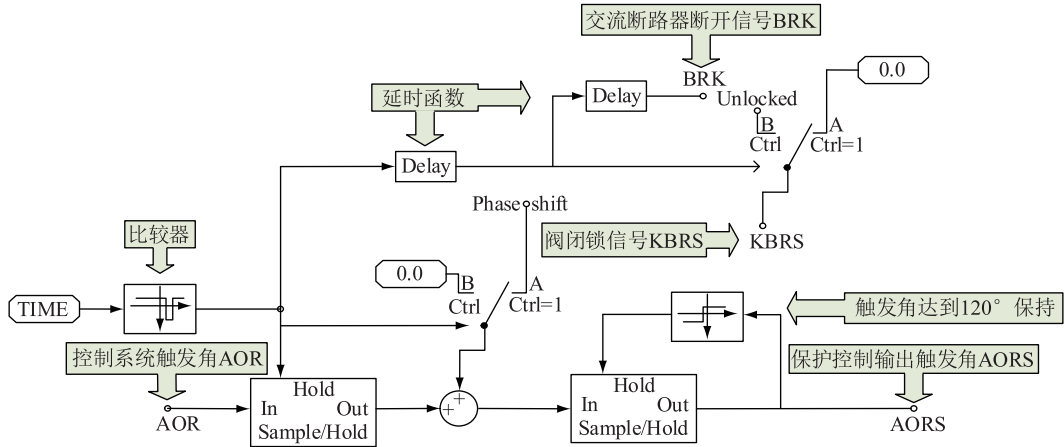


图8 整流侧闭锁

Fig.8 Rectifier side latching

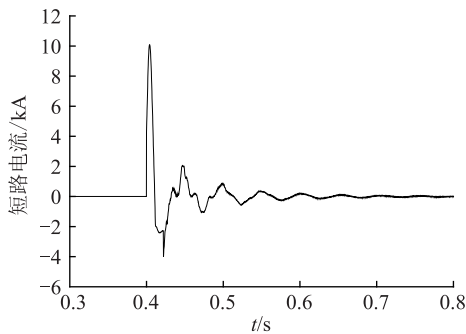


图9 直流极线故障电流波形

Fig.9 Current waveform of DC pole grounding fault

表9 单极金属方式下避雷器吸收的能量
Table 9 Absorbed energy of arresters after the protection control

避雷器	未采用闭锁的能量/kJ	采用闭锁的能量/kJ	抑制量/%
F ₁	32.056	32.138	-0.256
F ₂	513.972	0.477	99.907
F ₃	26 409.964	6 463.883	75.525

对地操作冲击耐受水平约为 1 859 kV, 低压端对地为 604 kV, 端子间为 2 463 kV。对比第 3 节的计算结果, 关键节点均未超过耐受水平, 避雷器吸收能量也均未超限, 因此可以认为目前的避雷器配置、保护控制策略合理。

5 结论

基于±1 100 kV 直流输电工程, 对直流滤波器在典型故障下暂态过电压及相应的保护配置进行仿真研究, 得出结论如下:

(1) 在直流滤波器可能发生的几种典型故障中, 直流滤波器短路最具有代表性。此种故障下, 增设避雷器后, 避雷器对滤波器内部过电压的幅值有明显抑制作用, 抑制量最大约为 28.83%, 但对过

电压的持续时间、波形和系统电压、电流影响较小。此外, 整流侧发生故障较逆变侧更严重; 单极金属回线方式发生故障较其他 2 种运行方式更严重。

(2) 在设置避雷器的基础上, 启动系统的保护控制直接影响系统的电流和能量分配, 中止换流阀的能量传输, 并将直流侧多余电能送回交流侧, 故障短路电流幅值可减小约 60%, 故障持续时间进一步缩短。单极金属回线方式下避雷器吸收的能量大大降低。

(3) 为直流滤波器配置了相应的避雷器、保护控制后, 滤波器支路过电压水平及故障电流都被限制在安全范围内, 且避雷器能量吸收均未超出限额, 因此工程中采用此种直流滤波器保护配置合理。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
ZHAO WanJun. Technology of HVDC transmission project[M]. Beijing; China Electric Power Press, 2011.
- [2] 罗敬华. 高压直流输电系统滤波器故障分析及对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
LUO Jinghua. Research on filter failure analysis and treatments in HVDC transmission systems[D]. Guangzhou; South China University of Technology, 2011.
- [3] SHAYMA' A M K, MOSTAFA S H, RAGI A R H, et al. Influence of a proposed converter transformer on harmonic suppression for HVDC systems [C]//Nineteenth International Middle East Power Systems Conference, 2017: 1133-1137.
- [4] 田邑安, 张万荣, 行鹏, 等. ±800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 73-77.
TIAN Yian, ZHANG Wanrong, XING Peng, et al. Study on the DC filter design for ±800 kV UHVDC transmission projects[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 73-77.
- [5] 刘志江. 多端柔性直流输电系统直流电压模糊控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 21-26.
LIU ZhiJiang. Research of DC voltage fuzzy control strategy for

- VSC-MTDC systems[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(2): 21-26.
- [6] 任军辉,张万荣,张帆,等. ±1 100 kV 直流输电工程直流滤波器方案研究[J]. *高压电器*, 2013, 49(3): 69-73.
REN Junhui, ZHANG Wanrong, ZHANG Fan, et al. Study on ±1 100 kV HVDC project DC filter scheme[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(3): 69-73.
- [7] 王峰,徐政,薛英林. 参数可调节的高压直流输电系统直流滤波器方案[J]. *高电压技术*, 2011, 37(4): 1035-1040.
WANG Feng, XU Zheng, XUE Yinglin. DC filter design with parameters adjustable for HVDC transmission[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(4): 1035-1040.
- [8] 宋蕾,文俊,闫金春,等. 高压直流输电系统直流滤波器的设计[J]. *高电压技术*, 2008, 34(4): 647-651.
SONG Lei, WEN Jun, YAN Jinchun, et al. Design of DC filter for HVDC transmission system[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(4): 647-651.
- [9] PANG H, WANG Z, CHEN J. Study on the control of shunt active DC filter for HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1): 396-401.
- [10] 朱革兰,魏春枝,王钢. 三调谐直流滤波器高压电容故障分析与保护[J]. *高压电器*, 2010, 46(12): 78-81.
ZHU Gelan, WEI Chunzhi, WANG Gang. Failure analysis and protection of high voltage capacitor in three tuned DC filter[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(12): 78-81.
- [11] 梅筠颖,费斌,江德明,等. 直流滤波器高压电容器不平衡保护[J]. *电力与能源*, 2013, 34(5): 471-474.
MEI Junting, FEI Bin, JIANG Deming, et al. Analysis of the imbalance protection of DC filter's high voltage capacitors[J]. *Power and Energy*, 2013, 34(5): 471-474.
- [12] 梅念,李银红,陈东,等. HVDC 工程交/直流滤波器高压电容器不平衡保护的判据研究[J]. *电网技术*, 2011, 35(12): 229-234.
MEI Nian, LI Yinhong, CHEN Dong, et al. Criteria of unbalance protection for high voltage capacitors in AC/DC filters of HVDC power transmission projects[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(12): 229-234.
- [13] 周登洪,李媛,信建伟. 宝鸡换流站 HP12/36 直流滤波器高压电容器组不平衡电流保护[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2010, 31(1): 19-22.
ZHOU Denghong, LI Yuan, XIN Jianwei. High voltage capacitor bank unbalanced current protection of HP12/36 DC filter at Baoji converter station[J]. *Power Capacitor and Reactive Power Compensation*, 2010, 31(1): 19-22.
- [14] 邹强,马云龙,杨建明,等. 串联多端直流输电系统接地极拓扑研究[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(5): 132-136.
ZOU Qiang, MA Yunlong, YANG Jianming, et al. Electrode topology research in series multi-terminal HVDC transmission system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(5): 132-136.
- [15] 任军辉,黄莹,张万荣,等. 特高压直流输电工程直流滤波器故障分析及设备暂态定值研究[C]//中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集, 2007.
REN Junhui, HUANG Ying, ZHANG Wanrong, et al. Fault analysis of DC filter in UHVDC transmission project and research on equipment transient setting value [C]//Papers Collection of the 2007 Annual Academic Meeting of the High Voltage Commission of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2007.
- [16] 何建,熊超,李大成,等. 电能质量综合优化装置(MEC)在三相不平衡配电网中的应用[J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(4): 47-49.
HE Jian, XIONG Chao, LI Dacheng, et al. Application of power quality integrated optimization device (MEC) in three-phase unbalanced distribution network [J]. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(4): 47-49.
- [17] 汪剑峰,康龙. 特高压直流故障下的负荷控制精度研究[J]. *浙江电力*, 2018, 37(3): 22-25.
WANG Jianfeng, KANG Long. Research on load control precision under UHVDC faults[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(3): 22-25.
- [18] 陈锡磊,周浩,王东举,等. 向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程直流滤波器过电压与绝缘配合研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(3): 95-99.
CHEN Xilei, ZHOU Hao, WANG Dongju, et al. Study on overvoltage and insulation coordination of DC filter for ±800 kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(3): 95-99.
- [19] 童凯,宣佳卓,许烽,等. 浙江电网特高压直流输电工程保护闭锁策略[J]. *浙江电力*, 2018, 37(2): 31-35.
TONG Kai, XUAN Jiazhao, XU Feng, et al. Protection locking strategy of Zhejiang UHVDC transmission project[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(2): 31-35.
- [20] 谢龙君,王帮田,范少杰,等. ±1 100 kV 特高压直流输电工程直流滤波器过电压与绝缘配合[J]. *电力建设*, 2013, 34(11): 51-55.
XIE Longjun, WANG Bangtian, FAN Shaojie, et al. Overvoltage and Insulation Coordination of DC Filter in ±1 100kV UHVDC Power Transmission Project[J]. *Electric Power Construction*, 2013, 34(11): 51-55.
- [21] 韩平平,陈凌琦,胡迪,等. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 99-105.
HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 99-105.
- [22] 赵森林,卢亚军,吕鹏飞,等. 特高压直流保护动作策略优化[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(4): 143-149.
ZHAO Senlin, LU Yajun, LYU Pengfei, et al. Optimization of protection strategy in UHVDC project[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(4): 143-149.
- [23] 张国澎,周犹松,郑征,等. 有源电力滤波器指定次谐波补偿优化限流策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46

- (16):46-53.
ZHANG Guopeng, ZHOU Yousong, ZHENG Zheng, et al. Research on current-limiting optimization strategy for specific harmonic compensation of active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16):46-53.
- [24] 周浩, 丘文千, 孙可, 等. 特高压交直流输电技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014: 407-410.
ZHOU Hao, QIU Wenqian, SUN Ke, et al. UHVDC transmission technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014: 407-410.
- [25] 贾轩涛, 史博伦, 胡锦涛, 等. 永富直流三种功率输送方式在线转换直流过电压仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5):131-138.
JIA Xuantao, SHI Bolun, HU Jingen, et al. DC overvoltage simulation for online-switching of three power transmission modes in Yongfu HVDC project [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5):131-138.
- [26] 绝缘配合第3部分: 高压直流换流站绝缘配合程序: GB/T 311.3—2007[S]. 2007.
Insulation coordination part 3: insulation coordination program of HVDC converter station: GB/T 311.3—2007[S]. 2007.

作者简介:



吴钰颖

吴钰颖(1996),女,硕士在读,研究方向为特高压直流输电(E-mail: yywu626@stu.xjtu.edu.cn);

郭洁(1961),女,硕士,研究员,研究方向为特高压直流输电,电力系统过电压及其防护。

Typical fault overvoltage characteristics of ± 1 100 kV DC filter

WU Yuying, GUO Jie

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to study the typical fault overvoltage characteristics of ± 1 100 kV DC filter and its protection measures, this paper uses PSCAD simulation software to calculate the DC filter short circuit, C_1 and C_2 breakdown in the bipolar full voltage operation mode, unipolar-ground line operation mode and unipolar-metal line operation mode in the background of ± 1 100 kV Changji—Guquan UHVDC Transmission project. Besides, the transient overvoltage of the arrester is calculated under the most representative fault condition. Based on this, the impact of protection control strategies on overvoltage and energy is further studied. The results show that the overvoltage is more serious when the DC filter short-circuit fault occurs on the rectifier side; when the DC filter short-circuit fault occurs under the unipolar-metal operation mode, the overvoltage is more serious and the arrester absorbs more energy. After the arresters and protection control, the overvoltage values of the critical nodes are lower than the insulation level at the location, and the energy absorbed by the arresters does not exceed its capacity.

Keywords: ultra high voltage direct current(UHVDC) transmission; operation mode; DC filter; transient overvoltage; protection control strategy; power systems computer aided design

(编辑 钱悦)