

DOI: 10.7667/PSPC160793

换流器保护在交流故障下的出口时序特性分析

张志强¹, 余超耘², 刘强¹, 蔡泽祥²

(1. 广东省输变电工程公司, 广东 广州 510160; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 当交流故障的故障条件不同时, 换流器保护的出口结果和出口时间均具有不确定性, 针对该问题展开系统的研究。梳理了换流器区故障和换流器保护的类型, 并基于实际特高压直流工程的 RTDS 实验结果分析了交流故障下可能动作的换流器保护及其动作机理。详细分析了换流器保护的故障后电气特征离散性和计时原理, 指出这是导致换流器保护动作时间不确定的两个原因。进一步深入对比了交流故障下存在出口时序离散性的 3 种换流器保护的逻辑, 并结合上述特高压直流工程的 RTDS 实验结果分析了不同故障条件下这 3 种保护的出口时序特性。分析结果表明, 这些保护延时定值极为接近, 而且可能相互闭锁, 不同故障条件下三者的出口时序关系决定了不同的动作结果。

关键词: HVDC; 交流故障; 换流器保护; 响应特性; 出口时序

Research on the trip timing order characteristics of converter protections under AC faults

ZHANG Zhiqiang¹, YU Chaoyun², LIU Qiang¹, CAI Zexiang²

(1. Guangdong Province Transmission & Transformer Engineering Company, Guangzhou 510160, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper analyses the problem that the converter protections act uncertainly under different kinds of AC fault. Various internal faults and protections of converter zone are summarized, and the types of protection which can response to AC faults and the response mechanism are analyzed based on the RTDS experimental results of an actual UHVDC transmission system. This paper also analyses the uncertain electrical characteristics when faults occur as well as the timing principle of converter protections in detail, and points out that these are the two causes of the uncertain action of a converter protection. Further more, the logics of the protections whose trip order are uncertain under different faults are compared and the characteristics of their trip timing orders under different faults are analyzed based on the RTDS experimental results above. It reveals that the setting trip times of these protections are about the same, and one can probably be blocked by the others so that the trip timing orders under different faults determine the different action results.

Key words: HVDC; AC fault; DC converter protection; response characteristics; trip timing order

0 引言

随着高压直流输电技术的迅速发展, 直流输电以其远距离和大容量输电方面的优势得到了广泛的应用^[1-3]。直流保护的基本任务是保护直流系统的一次设备安全, 限制故障和不正常运行状态对电力系统的影响, 因此直流输电系统的安全稳定运行有赖于直流保护的合理配置与正确动作。

换流器区是直流输电系统最重要的区域之一。实际电网运行经验表明, 当发生交流故障时换流器保护可能动作^[4-6]。而目前该方面研究不足, 系统梳理较为缺乏, 这给故障分析和保护特性优化带来困

扰, 因此有必要针对交流故障下换流器保护的出口时序特性展开全面分析。

换流器区配置了多组不同原理的保护, 这些保护与故障的对应关系不明确, 动作范围出现重叠, 保护间的协调与配合决定了最终的出口结果。现有研究已对不同换流器保护的出口时序特性分别展开分析^[7-16]。例如, 文献[7]研究了直流差动保护的出口时序特性, 并提出优化改进措施; 文献[8]分析了阀短路保护在不同故障下的响应特性; 文献[9]针对和应涌流引起的桥差保护动作作展开研究。以上研究均只针对单一保护展开, 并没有考虑多个保护之间的配合作用及其对出口结果的影响。

本文结合实际特高压直流工程的 RTDS 实验,分析了交流故障下换流器保护响应特性与机理。在此基础上,从保护特征量特性和计时原理两个方面分析换流器保护自身出口时间不确定的原因,并结合保护动作逻辑的对比,深入研究多种换流器保护在交流故障下的出口综合时序特性,为保护的整定与协调优化提供指导。

1 交流故障下换流器保护的响应特性

1.1 换流器的故障类型与保护配置情况

直流继电保护根据被保护对象的不同划分区域,主要包括换流器保护、换流变压器保护、直流输电线路保护等。这 3 个保护区域以交流连接线上和直流侧出口处的电流互感器 CT 作为界限,如图 1 所示的方框区域 S 即为换流器保护区。

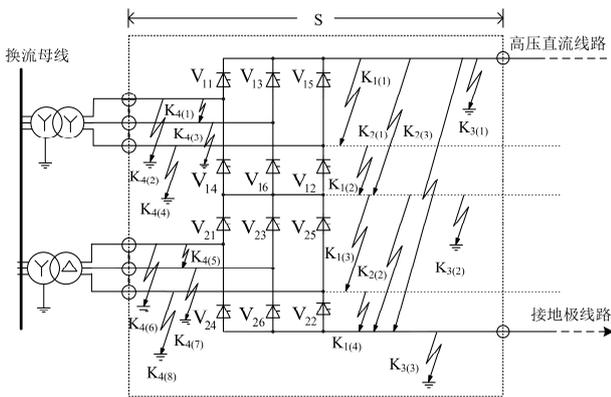


图 1 换流器区的故障类型示意图

Fig. 1 Diagram of fault types of converter

换流器区的故障分为换流器主接线回路短路故障和换流阀本体及其控制系统的故障。其中,主接线回路的故障包括阀短路故障 K_1 、直流侧出口短路故障 K_2 、直流侧出口对地短路故障 K_3 及交流连接线故障 K_4 ,如图 1 所示。而换流阀本体及其控制系统的故障包括阀片级故障、阀的不开通故障和误开通故障。换流器区的非正常运行状态主要包括逆变器换相失败、换流器过电压和过电流,这些状态均可能由换流器的区内和区外故障引起。

为反映上述换流器区的故障和非正常运行状态,换流器区域相应地配置了不同原理的保护,主要的保护类型如下。

(1) 差动保护组:换相失败保护、阀短路保护、直流差动保护、桥差保护和阀组差动保护等,均由换流器与换流变压器间交流连线的电流、换流器直流侧出口高压端及中性端的电流构成差值,不同保护具体逻辑不同。

(2) 谐波保护组:50 Hz 保护和 100 Hz 保护,通过对直流电流中谐波含量的检测来识别故障。

(3) 电压保护组、电流保护组:交流过电压、交流低电压、直流低电压保护以及交流过电流、直流过电流保护等,通过检测换流器交流、直流侧电压和电流的大小来实现保护。

(4) 触发保护组、换流器本体保护组等。

以上换流器保护与故障之间并非一一对应的关系,一种保护可以反应于多种故障,而对于一种故障的保护也有多种实现方法。因此,换流器保护对不同类型故障的响应情况不确定。

1.2 交流故障下换流器保护的响应特性与机理

由于在交流系统下换流器保护相关电气量的变化特征与换流器直流故障的情况具有相似性,因此多种换流器保护具有动作的可能性。

下面以一实际特高压直流输电工程的 RTDS 试验结果来分析交流故障下换流器保护的响应特性。表 1 为该直流工程两侧换流母线故障时换流器各保护的動作情况,此处仅列出动作的保护。

表 1 换流母线故障下换流器保护动作情况

Table 1 Response of converter protections under faults on the converter AC bus

整流/逆变侧	故障类型	换流器保护动作情况		
		直流低电压保护 27DC	阀组差动保护 87CG	桥差保护 87CBY
整流侧	三相接地	✓	×	×
	单相接地	✓	×	×
	两相接地	✓	×	×
逆变侧	三相接地	×	✓	×
	单相接地	✓	×	✓
	两相接地	✓	✓	✓

根据表 1,两侧交流系统故障下,可能动作的换流器保护有阀组差动保护、桥差保护和直流低电压保护,其响应机理具体分析如下。

阀组差动保护检测的是换流器直流侧出口电流与交流连线电流之差,其动作方程为

$$\min(I_{dH}, I_{dN}) - \max(I_{acY}, I_{acD}) > I_{set} \quad (1)$$

式中: I_{dH} 和 I_{dN} 分别为换流器直流侧出口的高压端和中性端电流; I_{acY} 和 I_{acD} 分别为 Y 桥和 D 桥交流连接线上的电流; I_{set} 为电流整定值。

正常情况下,换流器直流侧出口电流与交流连接电流相等,保护特征量为 0。当发生能够旁通或者直接短接整个逆变器的故障时,直流侧出口与交流侧之间出现支路,两个电流不再相等。逆变侧交流故障可能引发换相失败,使得连接同一相的两个阀同时导通而形成旁通对,从而出现差流。

桥差保护利用Y桥和D桥交流连接线电流的平衡关系构成差动,检测使得Y桥和D桥间引入其他支路或者不再对称的故障,其动作方程如下:

$$\text{Y 桥} \quad \max(I_{acY}, I_{acD}) - I_{acY} > I_{set} \quad (2)$$

$$\text{D 桥} \quad \max(I_{acY}, I_{acD}) - I_{acD} > I_{set} \quad (3)$$

逆变侧发生交流故障时,若换相失败导致只有一个桥出现旁通对,或者两个桥出现旁通对的时间不相等时,桥差保护特征量不为0,保护可能动作。

至于直流低电压保护,其检测的是直流线路电压 U_{dL} ,因而也可反应于逆变母线故障导致出现旁通对的情况。

由表1还可知,逆变母线发生两相接地故障时,上述三种保护均出现了动作的情况。但是,当该故障发生于不同时刻时,各个保护的動作结果存在着离散性,如表2所示。下文将针对这3种保护的出口时序特性加以研究。

表2 两相接地故障发生在不同时刻时各保护的動作结果

Table 2 Response of converter protections under the two-phase-ground faults occurring at different times

故障时刻/s	故障合闸角/(°)	保护出口时间/s		
		直流低电压保护	阀组差动保护	桥差保护
5.1000	0	—	6.054 35	6.0787
5.1005	9	6.120 95	—	6.1531
5.1010	18	6.120 95	—	6.164 35
5.1015	27	6.120 95	—	6.171 85
5.1020	36	6.120 95	—	—
5.1025	45	6.122 95	—	—
5.1030	54	6.124 95	6.108 75	—
5.1035	63	6.125 95	6.1037	—

2 交流故障下换流器保护出口时间特性

2.1 故障后换流器保护电气特征的离散性

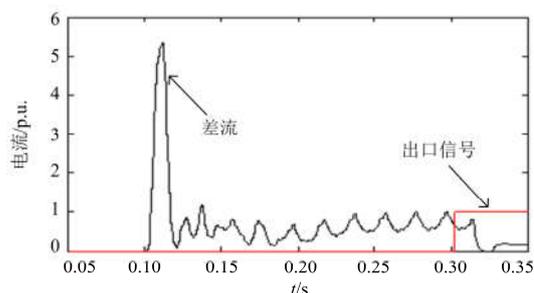
由于换相过程换流阀的切换和直流控制的非线性作用,故障发生后换流器保护的电气特征量呈现波动的现象。当发生直流故障时,保护特征量可以持续满足保护判据,一旦延时到达整定值,保护即可出口,故此时保护的出口时间基本确定。而交流故障下,当保护特征量处于整定值边界时,会在其附近上下波动,间歇性满足判据,因而造成保护动作,且保护出口时间不确定。下面以桥差保护为例加以说明。

如图2(a)所示,换流器直流侧中性端对换流器中点短路,桥差保护的差流在0~5 p.u.之间波动,但主要部分高于保护II段的定值0.07 p.u.,保护约在故障后0.2 s出口,出口时间与延时定值一致。而

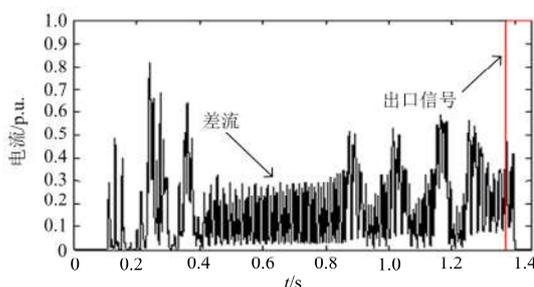
如图2(b),逆变母线发生单相接地故障时,桥差保护的差流虽然远低于区内故障,且波动更为显著,但仍有部分高于保护II段的定值0.07 p.u.,经1.23 s后保护满足出口条件而动作。

对于同一故障点,当故障类型不同时,换流器保护特征量波形的动态变化趋势存在差异,保护动作出口时间是不确定的,存在离散性。

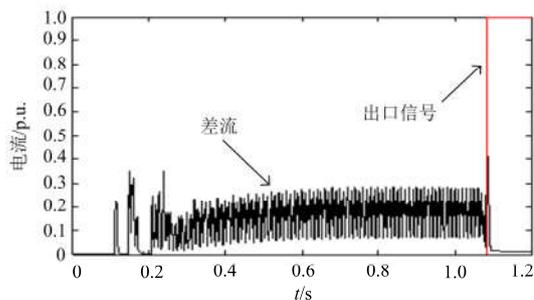
例如,图2(c)的逆变母线发生两相接地故障,桥差保护的差流动态过程与图2(b)的情况差异较大,桥差保护于故障后0.92 s出口,比图2(b)单相接地故障下的出口时间提前了0.31 s。



(a) 换流器直流侧中性端对换流器中点短路



(b) 逆变侧换流母线单相接地故障



(c) 逆变侧换流母线两相接地故障

图2 不同故障下桥差保护的差流和出口信号

Fig. 2 Differential current and trip signals of bridge differential protection under different faults

进一步,本文分析故障发生时刻不同对换流器保护特征量波形造成的影响。

根据表2,直流低电压保护的出口时间较为确定,基本为故障后1 s左右。这是由于故障后的低电压特征持续满足该保护判据,当延时满足定值1 s

时保护动作。因此，直流低电压保护的動作结果受故障时刻的影响较小。

阀组差动保护和桥差保护的特征量在不同故障时刻下差异性较大，满足延时定值所需的时间也大不相同。改变逆变母线发生单相接地故障的时刻，对比桥差保护的出口时间如表 3 所示。当故障发生于 5.1045 s 时，保护出口时间最早，为 6.17 s，而故障发生于 5.1015 s 时保护在 6.55 s 出口，二者相差了 0.38 s，大于保护的延时定值 0.2 s。

表 3 不同时刻单相接地故障下桥差保护的出口时间

Table 3 Trip time of bridge differential protection under the single-phase-ground faults occur at different times

故障时刻/s	故障合闸角/(°)	桥差保护出口时间/s
5.1000	0	6.37
5.1015	27	6.55
5.1030	54	6.22
5.1045	81	6.17

综合以上分析，不同的交流故障条件(故障类型和故障时刻)下换流器保护电气特征存在较大的离散性，保护出口时间并非定值，动作结果不确定。

2.2 换流器保护的计时原理

目前换流器保护的功能由两种原理不同的专用模块来实现，分别为 DIS1 模块和 DISA1 模块，两者基本逻辑相似，如图 3 所示。其中， X_1 和 X_2 为保护特征量的输入端， X_R 为保护定值， T 为保护延时。当 $|X_1 - X_2| \geq X_R$ 时，模块的内部计时器 Z 开始计时，在满足延时 T 时发出保护的出口信号。

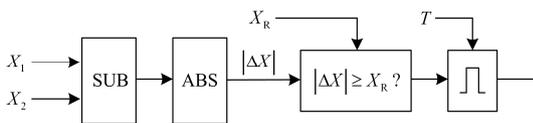


图 3 DIS1 和 DISA1 模块的基本逻辑示意图

Fig. 3 Diagram of the basic logics of DIS1 and DISA1 modules

在开始计时至保护出口的过程中，若电气特征量出现不满足判据的情况，则内部计时器 Z 对现有计时加以处理，并将其作为下一次满足判据时累计的初始值。DIS1 和 DISA1 模块的区别便在于不满足判据时 Z 对现有计时的处理方式，具体分析如下。

DIS1 模块采用的是直接计时的方式，每次采样时，若保护特征量满足判据，则 Z 的数值加 20，反之 Z 的数值不变。内部计时器 Z 的数值以此方式累计，在不被重置的前提下，当 Z 数值累计到达 $T \times 20$ ，则保护出口。而 DISA1 模块采用的方式为快充慢放，保护特征量满足判据时的计时方式与 DIS1 相同，但是在保护特征量不满足判据时， Z 的数值减

1，而不是维持原数值不变。同样地，在 Z 的数值累计达到上限值时保护出口。

根据以上对计时原理的分析，可知当换流器保护特征量不能持续满足判据时，最终保护的出口时间必将大于满足判据的时间，这加重了保护出口时间的不确定性。

3 交流故障下换流器保护出口综合时序特性

3.1 换流器 3 种保护动作逻辑对比

本文研究的实际直流工程中，阀组差动保护、桥差保护和直流低电压保护的分段、延时、闭锁信号与出口策略如表 4 所示。

表 4 实际直流工程中 3 种保护的動作逻辑对比

Table 4 Contrast of the action logics of the three protections of the actual UHVDC transmission system

保护名称	保护延时/ms	闭锁信号	出口策略
阀组差动保护	$U_{ac} > 0.8 \text{ p.u.}$: 200	阀组闭锁 投旁通对	阀组紧急停运
I 段	$U_{ac} < 0.8 \text{ p.u.}$: 800		
阀组差动保护	30		
II 段			
桥差保护 I 段	200		
桥差保护 II 段	$U_{ac} > 0.8 \text{ p.u.}$: 200	—	阀组紧急停运
	$U_{ac} < 0.8 \text{ p.u.}$: 800		
直流低电压			
保护 I 段	1000	极闭锁	跳故障阀组
直流低电压	整流侧: 1000 逆变侧: 3000	线路故障	极闭锁

根据表 4，当 $U_{ac} < 0.8 \text{ p.u.}$ 时阀组差动保护 I 段和桥差保护 II 段的延时定值均为 800 ms，与直流低电压保护 I 段、整流侧低电压保护 II 段的延时定值 1 s 极为相近。此外，阀组差动保护和低电压保护均有闭锁信号，分别为阀组闭锁或投旁通对、极闭锁或线路故障，而桥差保护没有闭锁信号。这 3 种保护的出口均会导致直流闭锁，而直流的闭锁又会闭锁阀组差动保护和直流低电压保护。

以上分析表明，阀组差动保护、桥差保护和直流低电压保护 3 者不仅保护范围重叠、延时相近，而且可能相互闭锁。

3.2 换流器 3 种保护的出口综合时序特性

表 2 中不同时刻发生交流故障时，3 种保护出口结果具有不确定性，这不仅取决于第 2 节中交流故障下保护自身出口时间的离散性，更取决于保护之间动作结果的相互约束。以下针对几个动作结果不同的故障时刻，详细分析这 3 种换流器保护的出口综合时序特性，具体的动作时间和闭锁时间如表 5 所示。

表 5 不同故障时刻下 3 种保护的動作时间和闭鎖时间
Table 5 Trip and block times of the three protections under the two-phase-ground faults occur at different times

故障时刻/s	保护	動作时间/s	闭鎖时间/s
5.1000	閘组差动保护	6.054 35	6.0805
	桥差保护	6.0787	—
	直流低电压保护	—	6.0900
5.1005	閘组差动保护	—	6.1800
	桥差保护	6.1531	—
	直流低电压保护	6.120 95	6.1415
5.1020	閘组差动保护	—	6.1800
	桥差保护	—	—
	直流低电压保护	6.122	6.145

当故障时刻为 5.1 s 时, 閘组差动保护最先动作, 闭鎖直流。随后直流低电压保护被闭鎖而不再动作, 而桥差保护没有闭鎖信号, 且在直流被闭鎖前已满足延时定值, 故可以动作。

当故障时刻为 5.1005 s 时, 最先动作的是直流低电压保护, 保护出口后闭鎖直流。在 6.18 s 时閘组差动保护收到闭鎖信号, 保护不再动作; 而桥差保护在 6.1531 s 时满足延时而定值。

当故障时刻为 5.102 s 时, 只有直流低电压保护动作。同样地在 6.18 s 时閘组差动保护被闭鎖, 而桥差保护则在直流闭鎖之前仍未达到延时定值, 因而这两个保护均不动作。

根据以上分析, 直流低电压保护的動作结果主要取决于閘组差动保护和桥差保护的動作时间, 在未被闭鎖的情况下, 故障后 1 s 左右即可出口。然而, 若閘组差动保护或桥差保护先动作, 则直流低电压保护会被闭鎖。閘组差动保护和桥差保护的出口时间受故障时刻的影响较大。閘组差动保护的出口只可能发生在其接收到闭鎖信号之前; 而桥差保护没有闭鎖信号, 故只要在直流闭鎖前达到延时定值, 则可以动作。

结合 3.1 和 3.2 节, 可知交流故障下不同换流器保护的出口时序关系最终造成保护响应结果的不确定, 这不利于直流的运行维护和事故处理。换流器保护本身出口时间的离散性是由电气特性和计时原理所决定, 难以改进, 故为避免该情况, 须在保护定值的整定时考虑各保护间的时序配合。

4 结论

本文针对交流故障下换流器保护出口结果不确定的问题, 研究了换流器保护自身的出口时间特性和多种保护的出口综合时序特性, 为换流器保护的优化提供依据。主要结论如下:

1) 交流故障下可能动作的换流器保护有閘组差动保护、桥差保护和直流低电压保护, 分别动作于逆变侧交流故障引发换相失败后的电流不平衡特征和两侧交流故障后的低电压特征。

2) 交流故障下换流器保护的特征量在整定值上下波动, 间歇性满足判据, 且其动态变化过程受到故障类型和故障时刻等因素的影响, 出口时间并非定值。

3) 直流保护的两类专用模块 DIS1 和 DISA1 均采用累计的方式计时, 交流故障下换流器保护的出口时间大于满足判据的时间, 这加重了保护出口时间的不确定性。

4) 閘组差动保护、桥差保护和直流低电压保护延时极为接近, 且可能相互闭鎖, 因而保护的出口受到其他两个保护动作结果的约束, 最终导致了不同交流故障条件下保护响应结果的不确定性。

参考文献

- [1] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121. WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [2] 张庆武, 潘卫明, 张靖, 等. ±1100 kV 直流控制保护系统冗余设备故障处理的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 148-153. ZHANG Qingwu, PAN Weiming, ZHANG Jing, et al. Discussion on fault handles about redundant devices of control and protection system for ±1100 kV UHVDC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 148-153.
- [3] 胡永银, 李兴源, 李宽, 等. 云广特高压直流输电工程换流閘过负荷能力分析 with 计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 102-106. HU Yongyin, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Analysis and calculation of converter valve overload capability in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 102-106.
- [4] 谢惠藩, 杨光源, 彭光强, 等. 云广特高压直流差动保护误动原因分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 130-135. XIE Huifan, YANG Guangyuan, PENG Guangqiang, et al. Malfunction analysis on DC differential protection of Yunnan-Guangdong UHVDC[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2013, 37(14): 130-135.
- [5] 汪道勇, 黄道春, 崔雨, 等. 葛洲坝换流站 D 桥差动保护动作原因及整改[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1504-1508.
WANG Daoyong, HUANG Daochun, CUI Yu, et al. Reasons of differential protection action and reform measures for Gezhouba converter station D bridge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1504-1508.
- [6] 曾宪刚, 王志滨, 吕伟权. 交直流混合系统中交流故障对直流的影响分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 29-32.
ZENG Xiangang, WANG Zhibin, LÜ Wei-quan. Analysis on influence of AC system fault in AC/DC hybrid system on HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 29-32.
- [7] 余超耘, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 换流器直流差动保护动作特性分析与优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1744-1750.
YU Chaoyun, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis and optimization on operating characteristic of DC differential protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1744-1750.
- [8] 张颖, 邵能灵, 徐斌. 高压直流输电系统阀短路保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 97-102.
ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Operation characteristics analysis for valve short-circuit protection in HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 97-102.
- [9] 郑伟, 张楠, 周全. 和应涌流导致直流闭锁极保护误动作分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 119-124.
ZHENG Wei, ZHANG Nan, ZHOU Quan. Analysis of DC blocked pole protection misoperation caused by sympathetic inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 119-124.
- [10] 李豹, 熊双成, 李金安, 等. 特高压直流保护逻辑元件对保护特性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 133-137.
LI Bao, XIONG Shuangcheng, LI Jinan, et al. Study on the influence of logical module on UHVDC protective characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 133-137.
- [11] 孙恒明, 曹继丰. 高压直流换流器差动保护抗干扰性能研究[J]. 南方电网技术, 2009, 2(5): 28-31.
SUN Hengming, CAO Jifeng. Study on anti-jamming performance of differential protection in HVDC converter[J]. Southern Power System Technology, 2009, 2(5): 28-31.
- [12] 沈志刚, 张海燕. 南桥换流站阀侧套管故障录波分析及阀短路保护改进建议[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 98-102.
SHEN Zhigang, ZHANG Haiyan. TFR analysis of Nanqiao converter transformer fault and proposal for improving valve short circuit protection[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 98-102.
- [13] 严兵, 李俊霞, 张又珺. 特高压直流保护专有功能概述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 73-75, 85.
YAN Bing, LI Junxia, ZHANG Youjun. Special protection functions in UHV DC system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 73-75, 85.
- [14] 刘敏, 张楠, 邹卓霖, 等. 直流保护系统 CT 饱和引起直流工程桥差保护误动分析及改进措施[J]. 继电器, 2007, 35(21): 10-13.
LIU Min, ZHANG Nan, ZOU Zhuolin, et al. Analysis of a unwanted trip of the bridge differential protection caused by CT saturation state and its improved ways[J]. Relay, 2007, 35(21): 10-13.
- [15] 成敬周, 徐政, 张静. 交流系统横向故障对HVDC 100 Hz 保护影响及特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 223-228.
CHENG Jingzhou, XU Zheng, ZHANG Jing. Influence of transverse faults in HVAC power system on HVDC 100 Hz protection of HVDC transmission system and analysis on its characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 223-228.
- [16] 霍鹏飞, 王国功, 刘敏, 等. 向上±800 kV 特高压直流输电工程的直流保护闭锁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 137-139.
HUO Pengfei, WANG Guogong, LIU Min, et al. The DC protection block strategy in Xiangjiaba-Shanghai ±800 kV UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 137-139.

收稿日期: 2016-06-01; 修回日期: 2016-08-05

作者简介:

张志强(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、控制与自动化; E-mail: 13802606679@139.com

余超耘(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: yucy_scut@163.com

刘强(1972-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统设计、保护与自动化。E-mail: 249841362@qq.com

(编辑 周金梅)