

直流滤波器保护关键问题的研究

田培涛, 黄金海, 吴庆范, 张爱玲, 岳笑歌, 宋延涛

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 在分析直流滤波器的结构及测点配置、直流滤波器保护系统的配置策略和保护功能的配置策略的基础上, 对目前特高压工程中直流滤波器保护存在的关键问题进行研究并提出建议和优化方案。对于直流滤波器高低侧电流 CT 暂态特性不一致导致保护误动的问题, 建议采用新的直流滤波器差动保护判据, 并在高低压侧采用光 CT 测量装置。针对模拟量故障导致三取二逻辑出口策略可靠性降低的问题, 提出了一种新的三取二逻辑出口策略。利用 RTDS 对高压电容器 C1 内部接地故障进行了仿真分析, 给出了一种新的保护功能判据和定值建议。通过对以上关键问题的研究, 为后续高压直流工程中的直流滤波器保护的设计提供有益的参考。

关键词: 高压直流; 配置策略; 三取二; RTDS 仿真; 可靠性

Study on the key problems of DC filter protection

TIAN Peitao, HUANG Jinhai, WU Qingfan, ZHANG Ailing, YUE Xiaoge, SONG Yantao

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the analysis of the structure of DC filters, measuring point arrangement, protection system of DC filters and protection configuration strategy of protection function, the key problems in current DC filter protection of UHVDC are studied, and the corresponding suggestion and optimization scheme are given. For the protection misoperation caused by the inconsistent transient characteristics of DC filters high side and low side CT current, using the new DC filter differential protection criterion and installing optical CT measuring device in the high side and low side are suggested. Aiming at the low reliability of “selecting 2 from 3” logic export strategy caused by analog fault, a new “selecting 2 from 3” logic export strategy is proposed. The high voltage capacitor C1 internal grounding fault is simulated and analyzed by using RTDS, and a new protection function criterion and setting value suggestions are given. Study on these key problems provides a useful reference for the design of DC filter protection in the subsequent HVDC project.

Key words: HVDC; configuration strategy; selecting 2 from 3; RTDS simulation; reliability

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)18-0144-06

0 引言

特高压直流输电工程在运行过程中将不可避免地在直流侧产生谐波电压和谐波电流, 而这些谐波分量会引起直流侧设备的附加发热, 影响系统的运行性能。如果流入采用架空线的直流线路中, 还会对线路附近的通信系统造成影响^[1]。直流滤波器作为换流站内的重要设备之一, 主要用来降低流入直流线路和接地极引线中的谐波分量, 保证换流器在各种运行方式下的最大等效谐波电流不超过其限值^[2]。由于直流滤波器运行工况较为复杂, 因直流滤波器故障导致直流系统停运的事故较多, 为其配置完善、可靠的保护系统对高压直流输电系统的可

靠运行具有非常重要的意义。

目前直流滤波器保护技术在除背靠背直流输电工程以外的直流输电工程中广泛应用, 但是技术还不够成熟, 为了保证直流滤波器更加安全、稳定、可靠运行, 有必要对目前直流滤波器保护系统存在的关键问题进行研究。

本文以宾金特高压直流输电工程为例, 分别从直流滤波器的测点配置、保护系统配置策略和保护功能配置等方面进行分析, 并对其中的关键问题进行研究。

1 直流滤波器结构及测点配置

直流滤波器装设在直流高压极线和直流中性线

之间, 由电容器、电抗器和电阻串并联构成。在特高压直流输电工程中, 一般采用双调谐结构或三调谐结构的直流滤波器。宾金特高压直流工程中采用了含有 HP2/39 和 HP12/24 两个支路的双调谐直流滤波器, 图 1 为该滤波器结构及测点配置示意图。

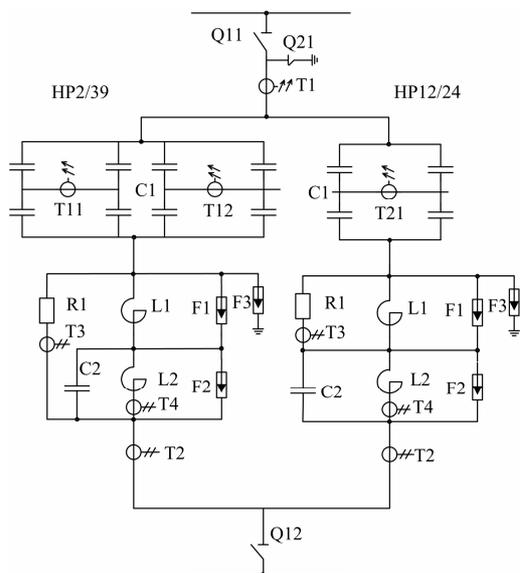


图 1 直流滤波器结构及测点配置图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical HVDC filter structure

在图 1 中, T1、T2 分别为直流滤波器高、低压侧电流测点; T11、T12 和 T21 为不平衡电流测点; T3、T4 分别为电阻 R1 和电抗器 L2 的电流测点。

宾金特高压直流工程中, 直流滤波器高压侧电流测点和不平衡电流测点采用光 CT 测量装置, 而低压侧电流测点、电阻 R1 和电抗器 L2 的电流测点均为常规电磁式电流互感器。

2 直流滤波器保护系统配置策略

直流滤波器保护常用的两种配置方案, 一种是采用三取二配置, 常用于特高压直流工程中; 另一种是完全双重化配置, 采用“启动+保护”出口策略, 一般用在常规直流输电工程中。两种配置方案相比, 三取二配置在可靠性和经济性方面均优于完全双重化配置^[3-5]。

在特高压直流输电工程中, 直流滤波器保护不单独配置屏柜, 而是集成在直流极保护中。直流滤波器保护采用三重化的冗余配置: 三套测量系统完全独立, 三套保护装置功能也完全相同。测量系统通过 TDM 总线将模拟量信号送至保护系统, 保护动作信号经过三取二逻辑判断并出口, 在一套保护系统发生故障的情况下, 不会导致直流系统停运, 保护系统具备较高的可靠性^[6]。

三取二装置接收保护的系统 OK 信号和保护动作信号, 并经过逻辑判断输出保护动作信号。如果有任何一套测量系统故障或者保护系统本身故障, 该套保护系统将退出, 此时三取二逻辑会自动切换到二取一逻辑, 并输出保护动作信号^[7]。三取二装置内部的逻辑图如图 2 所示。

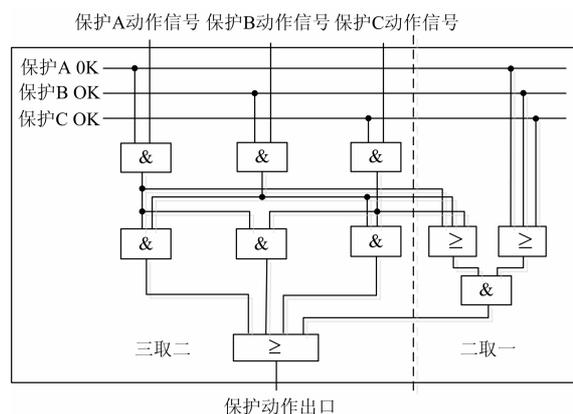


图 2 三取二装置内部逻辑图

Fig. 2 Internal logic diagram of traditional “selecting 2 from 3” device

3 直流滤波器保护功能配置策略

宾金特高压直流输电工程中, 直流滤波器保护功能典型配置为: 直流滤波器差动保护、电容器 C1 不平衡保护和直流滤波器电抗器、电阻过负荷保护。以下分别对各保护功能配置进行简单介绍。

3.1 直流滤波器差动保护

直流滤波器差动保护的保护区为直流滤波器高压侧测点 T1 至高压电容器 C1 间区域和高压电容器 C1 至低压侧测点 T2 间的区域, 通过采集直流滤波器高压测电流 I_{T1} 和直流滤波器低压侧电流 I_{T2} , 为直流滤波器内部的接地故障提供保护。典型的保护判据、定值和动作策略如式(1)。

$$|I_{T1} - I_{T2}| > 40 \text{ A} + 0.5 \cdot |I_{T1}| \text{ \& } |I_{T1}| < 180 \text{ A} \quad (1)$$

式(1)为 I 段保护判据及定值, 延时 200 ms; 动作策略: 拉开直流滤波器高压侧隔离刀。

$$|I_{T1} - I_{T2}| > 40 \text{ A} + 0.5 \cdot |I_{T1}| \text{ \& } |I_{T1}| > 180 \text{ A} \quad (2)$$

式(2)为 II 段保护判据及定值, 延时 200 ms; 动作策略: 发移相闭锁命令到极控系统, 停运高压直流输电系统。

$$|I_{T1} - I_{T2}| > 180 \text{ A} + 0.5 \cdot |I_{T1}| \quad (3)$$

式(3)为 III 段保护判据及定值, 延时 20 ms; 动作策略: 发移相闭锁命令到极控系统, 停运高压直流输电系统。

该直流滤波器差动保护采用了常数加比率制动

的新型判据，和传统的差动保护采用电流差值大于某一固定定值的判据相比，有效地降低了常规电磁式 CT 因发生饱和导致保护误动和拒动的风险。

3.2 电容器 C1 不平衡保护

高压电容器 C1 不平衡保护主要针对 C1 内部电容器单元不对称损坏或短路故障，如果发生故障，将产生不平衡电流，其大小与短路电容器单元数量及总电流相关，不平衡电流与总电流的比值可以通过理论计算得到^[8]。以图 3 中的 HP 12/24 为例，典型的保护判据、定值和动作策略为

$$\frac{I_{T21}}{I_{T2}} > 0.0084 \quad (4)$$

式中： I_{T21} 为流过 HP12/24 组直流滤波器的不平衡电流； I_{T2} 为流过 HP12/24 低压侧的总电流，0.0084 为发生两台电容短路时的理论计算定值。延时 10 s 后发出告警事件。

3.3 电抗器、电阻过负荷保护

电抗器和电阻过负荷保护主要针对各次谐波对直流滤波器元件产生的过负荷，避免直流滤波器电抗器和电阻过应力，保证元件在热承受能力范围。

保护逻辑根据元件“热时间常数”采用反时限逻辑，保护动作特性符合 IEC_60255-8 标准。

电抗器过负荷保护需考虑“集肤效应”，相关的参数设置根据电抗器厂家提供各次谐波的集肤效应系数计算得到。

4 关键问题研究

4.1 测点配置的建议

在国网特高压直流工程中，直流滤波器低压侧电流测量装置采用常规电磁式 CT，但常规电磁式 CT 存在带宽窄、容易磁饱和、次级开路高电压等固有缺点，并且在换流站内高磁场的的环境下，高压电容器 C1 以下发生接地故障时无法保证所测电流的精度。同时造成直流滤波器高、低压侧电流互感器暂态特性不一致^[9]，当有较大的穿越电流时，直流滤波器差动保护容易发生误动^[10]。

本文 3.1 节中的直流滤波器差动保护策略虽然能够有效避免高、低压侧电流互感器暂态特性不一致的问题，但在部分工程中并未采用此策略。为了从根本上解决问题，建议后续工程直流滤波器高、低压均应采用光 CT 测量装置。

4.2 三取二出口逻辑的优化

由于采用三重化的配置策略的可靠性高于双重化配置，故建议后续高压、特高压直流输电工程的直流滤波器保护均集成在极保护屏中采用三重化配

置，通过三取二逻辑出口。

现有的三取二逻辑实现方法采用的直流保护系统 OK 信号中包含了测量系统故障信号，即任一模拟量发生测量故障时，本套直流保护系统的 OK 信号将消失，三取二逻辑切换为“二取一逻辑”，即使与本测量故障无关的其他保护功能出口逻辑也切换为“二取一逻辑”，降低了三取二逻辑及整个系统的可靠性。宜金直流工程在投运的半年时间内曾多次出现直流保护系统因光 CT 合并单元故障导致单套测量系统故障、相应保护系统退出的隐患，由于三取二逻辑切换为了二取一逻辑，检修人员在处理此问题的过程中，剩余的两套保护系统中只要有一套保护误动，保护动作就将出口，误动风险较大。

故对现有的三取二逻辑实现方法进行优化，将直流保护系统 OK 信号中的测量故障信号单独分离出来，使每个保护功能的测量故障信号作为独立的三取二逻辑判断条件，与测量故障信号相关的保护信号切换到“二取一逻辑”，其他保护信号依然为“三取二”逻辑，该方法能够有效地避免任一测量故障引起整套直流保护功能退出造成误动或拒动的风险，提高三取二逻辑及直流保护系统的可靠性。优化后的三取二逻辑框图如图 3 所示。

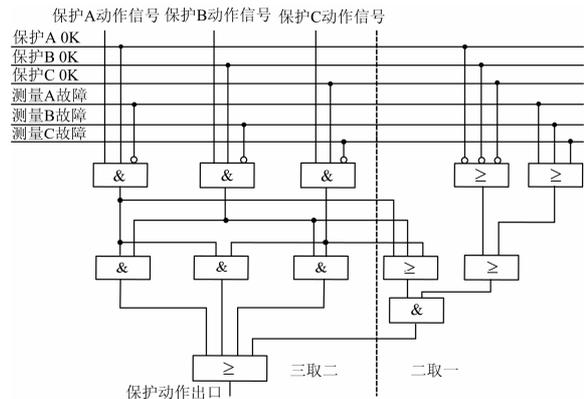


图 3 优化后的三取二内部逻辑框图

Fig. 3 Internal logic diagram of traditional “selecting 2 from 3” device after optimization

在图 3 中，三取二逻辑首先对测量故障信号进行判断，如果此测量故障与保护功能无关，则按照图 3 中左半部分逻辑进行运算，通过此部分逻辑框图可以看出，与测量故障无关的保护功能依然保持了“三取二逻辑”，当两套及以上保护动作后，保护动作才能出口。如果测量故障信号与保护功能有关，则会切换到图 3 中的右半部分逻辑进行运算，三取二逻辑自动切换到“二取一逻辑”，剩余两套保护中的任一保护动作，该保护动作将出口。由此看见，

该优化方案能够最大限度地保持三取二逻辑, 提高三取二逻辑及直流保护的可靠性。

4.3 高压电容器 C1 内部接地故障的研究

由于高压电容器 C1 在运行过程中承受着较大的电压应力, 因此也是较容易损坏的设备。目前投运的特高压直流工程中, 针对高压电容器 C1 内部故障仅设置了不平衡保护, 并且仅仅考虑了电容器某几个元件或单元损坏导致的不平衡电流^[11-13], 事实上, 由于高压电容器 C1 内部发生接地故障时, C1 将承受远远超过正常值的电压应力, 因此对于 C1 内部接地故障需要进一步的研究。

根据电容器厂家提供的实际运行中可能发生的故障位置, 利用 RTDS 搭建故障仿真模型, 对任意可能发生的故障点进行仿真试验^[14]。以宾金特高压直流工程为例, 对直流滤波器 HP 12/24 支路高压电容器设置故障点, 每个故障点故障时间设置为 2 s。利用 RTDS 搭建的故障仿真模型如图 4 所示。

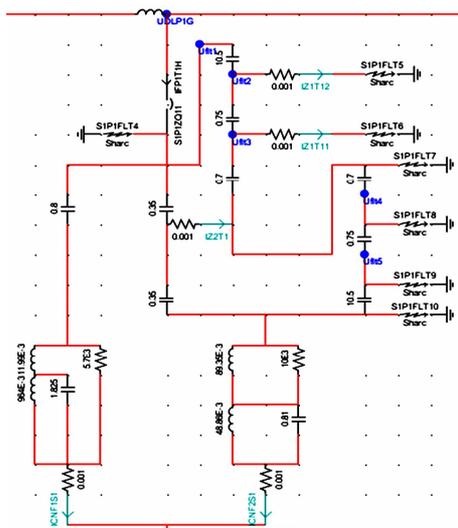


图 4 RTDS 故障仿真模型

Fig. 4 Schematic diagram of RTDS simulation model

在图 4 中, RTDS 设置了 7 个故障点, 各故障点具体位置如表 1 所示。

表 1 高压电容器 C1 内部接地故障位置

Table 1 High voltage capacitor C1 internal grounding fault location

故障编号	故障位置
SIP1FLT4	高压 CT 下端至电容上端间故障
SIP1FLT5	第 2、3 个单元间接地故障
SIP1FLT6	第 30、31 个单元间接地故障
SIP1FLT7	第 60、61 个单元间接地故障
SIP1FLT8	第 90、91 个单元间接地故障
SIP1FLT9	第 118、119 个单元间接地故障
SIP1FLT10	电容下端至低压 CT 上端故障

分别在单极大地回线 0.1 p.u.、单极大地回线 1.0 p.u.、双极大地回线 0.1 p.u.和双极大地 1.0 p.u. 四种运行工况下进行故障特征分析和研究。试验结果见表 2~表 6(由于篇幅所限, 这里仅给出 SIP1FLT5、SIP1FLT6、SIP1FLT7、SIP1FLT8 四个故障点的试验结果)。

表 2 SIP1FLT5 故障点在四种运行工况下的试验结果

Table 2 Experimental results of fault location SIP1FLT5 in four

运行工况	kinds of operating conditions	
	不平衡电流	保护动作情况
单极 0.1 p.u.	瞬时增至 93 A, 最后稳定在 2 A	直流滤波器差动保护 II 段动作, 闭锁
双极 0.1 p.u.	瞬时增至 120 A, 最后稳定到 2 A	无保护动作
单极 1.0 p.u.	瞬时增至 120 A, 最后稳定在 2 A	直流滤波器差动保护 II 段动作, 闭锁
双极 1.0 p.u.	瞬时增至 100 A, 最后稳定在 2 A	无保护动作

表 3 SIP1FLT6 故障点在四种运行工况下的实验结果

Table 3 Experimental results of fault location SIP1FLT6 in four

运行工况	kinds of operating conditions	
	不平衡电流	保护动作情况
单极 0.1 p.u.	瞬时增至 880 A, 最后稳定在 6 A	无保护动作
双极 0.1 p.u.	瞬时增大到 860 A, 最后稳定在 6 A	无保护动作
单极 1.0 p.u.	瞬时增至 240 A, 最后稳定在 20 A	无保护动作
双极 1.0 p.u.	增大到 470 A, 最后稳定在 12 A	无保护动作

表 4 SIP1FLT7 故障点在四种运行工况下的实验结果

Table 4 Experimental results of fault location SIP1FLT7 in four

运行工况	kinds of operating conditions	
	不平衡电流	保护动作情况
单极 0.1 p.u.	瞬时增至 1 100 A, 最后稳定在 5 A	直流滤波器差动保护 II 段动作, 闭锁
双极 0.1 p.u.	瞬时增至 1 100 A, 最后稳定在 8 A	无保护动作
单极 1.0 p.u.	瞬时增至 260 A, 最后稳定在 22 A	直流滤波器差动保护 II 段动作, 闭锁
双极 1.0 p.u.	瞬时增至 40 A, 最后稳定在 14 A	无保护动作

表 5 SIP1FLT8 故障点在四种运行工况下的试验结果

Table 5 Experimental results of fault location SIP1FLT8 in four

运行工况	kinds of operating conditions	
	不平衡电流	保护动作情况
单极 0.1 p.u.	瞬时增至 60 A, 最后稳定在 3 A	无保护动作
双极 0.1 p.u.	瞬时增至 160 A, 最后稳定在 3 A	无保护动作
单极 1.0 p.u.	瞬时增至 100 A, 最后稳定在 8 A	无保护动作
双极 1.0 p.u.	瞬时增至 60 A, 最后稳定在 5 A	无保护动作

表 6 1.0 p.u.下各故障点不平衡电流系数及电容器单元电压
Table 6 Unbalanced current coefficient and capacitor unit
voltage of different fault location under 1.0 p.u.

故障位置	不平衡电流系数	电容器单元电压/kV
SIP1FLT4	0	0
SIP1FLT5	0.02	400
SIP1FLT6	0.3	26.7
SIP1FLT7	2.5	13.3
SIP1FLT8	1.5	8.9
SIP1FLT9	0.1	6.8
SIP1FLT10	0	6.7

通过以上仿真可知, 直流滤波器高压电容器内部接地故障在不同运行工况和接地点情况下有如下特点:

(1) 电容器中点接地时, 不平衡电流最大; 电容器两端接地时, 不平衡电流逐渐减小。

(2) 高压电容器内部不同故障点接地时, 不平衡电流系数的大小也不同, 但数值均高于现有保护不平衡保护定值。

(3) 现有的直流滤波器差动保护仅在部分工况和故障点时能够动作, 无法对 C1 内部接地故障提供全面有效的保护。

基于以上分析, 建议增加一种新的保护功能以实现高压电容器内部接地故障的保护, 主要包含以下判据和建议定值:

$$|I_{T1} - I_{T2}| > \Delta_1 + 0.5 \cdot |I_{T1}| \quad (5)$$

$$\frac{I_{T21}}{I_{T2}} > \Delta_2 \quad (6)$$

$$|I_{T21}| > \Delta_3 \quad (7)$$

式(5)为原直流滤波器差动保护判据, 但定值 Δ_1 要小, 建议设为 10 A; 式(6)为不平衡电流系数判据, 定值 Δ_2 高于原电容器 C1 不平衡保护, 建议取 0.03; 式(7)为不平衡电流数值判据, 建议定值 Δ_3 取 2 A, 当以上三个判据均满足时, 保护动作出口, 根据目前的仿真试验, 以上判据和定值能够实现对 C1 内部接地故障的保护。

5 总结

本文对目前直流滤波器保护中的关键问题进行了研究并提出相应的建议和优化方案。对于直流滤波器高低侧电流测量 CT 暂态特性不一致导致保护误动的问题, 建议后续工程中直流滤波器高低侧电流测量装置均采用光 CT。对目前高压直流工程中保护所采用的三取二逻辑策略进行了优化, 提出将测量故障信号从保护 OK 信号中分离出来的方

法, 避免测量信号故障退出整套保护系统的风险, 增加三取二逻辑和直流保护系统的可靠性。对高压电容器 C1 内部接地故障进行了仿真分析, 仿真结果表明现有直流滤波器保护功能无法为 C1 内部接地故障提供全面、有效的保护, 在此基础上, 给出了一种新的保护判据和定值建议。通过对以上关键问题的研究, 为后续高压直流工程中直流滤波器保护的设计提供有益的参考。

参考文献

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 文继峰, 陈松林, 李海英, 等. 超高压直流系统中的直流滤波器保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 69-72.
- [3] 刘耀, 王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 51-54.
LIU Yao, WANG Mingxin. Reliability analysis on redundant configuration of protective relays for HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 51-54.
- [4] 张望, 黄利军, 郝俊芳, 等. 高压直流输电控制保护系统的冗余设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 88-91.
ZHANG Wang, HUANG Lijun, HAO Junfang, et al. Redundant design of control and protection system for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 88-91.
- [5] 李延龙, 杨亚璞, 李楠. 高压直流输电控制保护系统的冗余可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 59-62.
LI Yanlong, YANG Yapu, LI Nan. Reliability research for HVDC transmission control and protection system redundancy[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 59-62.
- [6] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 基于 HCM3000 平台的高岭扩建工程直流极保护系统实施策略[J]. 东北电力技术, 2012, 33(10): 35-40.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy of Gaoling II project based on HCM3000 platform[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(10): 35-40.
- [7] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二逻辑装置及配置策略在高岭背靠背扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 121-126.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. A

- new device with “selecting 2 from 3” logic and its configuration strategy applied in Gaoling back-to-back II project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 121-126.
- [8] 黄金海, 冯雷, 李曼丽, 等. 糯扎渡送电广东特高压直流输电工程直流滤波器 C1 不平衡保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 46-51.
HUANG Jinhai, FENG Lei, LI Manli, et al. Study of DC filter C1 unbalance protection for Nuozhadu-Guangdong ultra high voltage direct current transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 46-51.
- [9] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [10] 田庆. 直流滤波器差动保护误动作分析[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 22-26.
TIAN Qing. Analysis on misoperation of DC filter differential protection[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 22-26.
- [11] 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.
- [12] 郑伟, 郭乾晋, 周全. 兴安直流 C1 不平衡保护采用计数方式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 42(1): 139-144.
ZHENG Wei, WU Qianjin, ZHOU Quan. Research on the use of counting scheme in C1 unbalance protection in Xing-an HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 42(1): 139-144.
- [13] 梅筠颀, 费斌, 江德明, 等. 直流滤波器高压电容器不平衡保护分析[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 & Energy, 2013, 34(5): 471-474.
- [14] 任军辉, 张万容, 孙伟, 等. 特高压直流输电工程直流滤波器故障仿真[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 50-53.
REN Junhui, ZHANG Wanrong, SUN Wei, et al. Simulation on UHVDC project DC filter faults[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 50-53.

收稿日期: 2014-12-18; 修回日期: 2015-01-19

作者简介:

田培涛(1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电保护软件设计及研究; E-mail: tpt850924@163.com

黄金海(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究;

吴庆范(1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究。

(编辑 葛艳娜)