

DOI: 10.7667/PSPC151793

谐波阻抗在直流滤波器保护中的应用

行武, 郭晓, 胡兵, 韩行军

(南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211151)

摘要: 直流滤波器是高压直流输电系统不可或缺的设备。目前直流滤波器保护都采用单一的电流量保护, 并且大都利用调谐频次电流作为保护量。当滤波器靠近首端接地故障时, 滤波器调谐频率发生较大偏移, 调谐频次电流减小, 使得滤波器差动保护差流较小, 灵敏度不足, 保护可能出现拒动。提出了滤波器谐波阻抗保护, 保护同时接入电压和电流作为保护量, 计算滤波器较小调谐频次的谐波阻抗大小作为保护判据, 滤波器靠近首端接地故障时保护灵敏度高, 并可以反应多种故障, 也可作为滤波器失谐监视判据。通过 PSCAD 仿真验证了该判据的可行性和可靠性, 这将对直流滤波器进行更加完善可靠的保护。

关键词: 直流滤波器保护; 谐波阻抗; PSCAD; 高压直流输电

Application of harmonic impedance in the DC filter protection

XING Wu, GUO Xiao, HU Bing, HAN Xingjun

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211151, China)

Abstract: The DC filter is an indispensable equipment in the HVDC transmission system. At present, DC filter protections only use the current protection, and most of which use the tuning frequency current. When the earth fault is close to the head end of filter, there is a greater shift of tuning frequency, and the harmonic current is reduced, so the differential current of filter is reduced, and the protection is lack of sensitivity, and the protection may not operate. In this paper, the harmonic impedance protection is proposed, and the protection makes use of voltage and current, and uses smaller tuning frequency harmonic impedance magnitude as the protection criterion. When the earth fault is close to the head end of filter, the protection with high sensitivity can respond many kinds of faults, but also as a filter detuning monitoring criterion. The simulation using PSCAD verifies the feasibility and reliability of protection, and the harmonic impedance protection will protect the DC filter more reliably.

Key words: DC filter protection; harmonic impedance; PSCAD; HVDC

0 引言

高压直流输电以其大容量、低损耗, 可以实现区域电网非同步互联等独特优势在我国得到迅猛发展^[1-2]。在直流系统中换流器会产生大量的特征谐波, 例如12脉波换流器会产生大量的 $12k(k=1, \dots, n)$ 次谐波^[3-6], 大量的谐波将会引起直流设备发热损坏, 同时谐波也会干扰通信, 而且谐波也会渗透到交流系统, 引起交流系统电能质量下降等众多问题。因此直流系统都配备有直流滤波器, 直流滤波器的安全稳定运行将会直接影响直流系统的可靠持续运行^[7-8]。

目前直流滤波器保护基本都采用电流量作为保护量对滤波器进行保护, 虽然滤波器配备了差动,

电流不平衡等较为成熟的保护, 但是在实际应用中还是不免出现保护误动拒动等问题^[9]。已有很多学者对直流滤波器故障进行了大量的研究, 提出各种故障研究方法^[10]以及不同的保护方案^[11-15], 为滤波器保护的完善起到了重要的作用。但是目前滤波器保护还是存在的问题, 例如滤波器在靠近首端发生接地故障时, 滤波器调谐频率会发生较大偏移, 流过滤器调谐频率的谐波电流会大大减小, 使得滤波器两侧的谐波电流在故障时差流极小, 此时以调谐频次电流作为保护量的电流差动保护灵敏度大大降低, 保护可能会出现拒动, 无法迅速地切除故障, 而且此时由于谐波电流大小及谐波频率变化情况无法完全确定, 因此直流滤波器配备的以3、6、12次谐波电流大小为判据的不平衡保护可能无法动

作切除滤波器。导致故障持续存在损坏滤波器设备。因此提出一种能够改善直流滤波器保护缺陷的保护判据就显得尤为重要。

本文提出了一种增量比幅式直流滤波器谐波阻抗保护，同时接入电压和电流量作为保护量，可以更加全面地反应滤波器的运行工况，其中谐波阻抗选取滤波器调谐频次较低频率的谐波阻抗，这样可以降低保护的采样频率，节约资源。在滤波器靠近首端故障时由于调谐频率偏移，谐波阻抗会大大增加，因此该保护有较高的灵敏性，可以改善差动保护此时灵敏度不足的问题，而且可以反应滤波器多种故障以及滤波器失谐等问题。通过在电磁暂态仿真软件PSCAD中建立直流系统及直流滤波器模型，仿真验证了该保护的可行性和高可靠性。

1 直流滤波器保护分析

1.1 直流滤波器保护配置

直流滤波器虽然在直流输电工程中广泛应用，但技术还不完善，也没有具体的技术规范，目前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；另外一种是完全双重化配置，一般用在常规直流输电工程中。

目前直流滤波器保护典型配置主要配有直流滤波器差动保护和电容不平衡保护为主保护，还有作为后备保护的过流保护和电阻电抗过负荷保护，所有的保护都是单一的电流保护^[16-17]。

直流滤波器差动保护主要反映滤波器接地故障，差动电流选取滤波器调谐频次较低频率的电流。电容不平衡保护主要保护高压电容故障，当电容发生不平衡故障时，就会有不平衡电流流过，保护动作跳闸，在 12 脉波换流器系统中通常电流选用 3、6、12 次谐波电流作为保护量，当其中任意两种及以上谐波电流大于不平衡电流定值时保护动作告警或切除滤波器^[18]。除此之外滤波器还配有过流保护和电阻电抗过负荷保护，以防滤波器流过较大的谐波电流导致滤波器及元件过热而损坏。

直流滤波器保护具体配置如图 1 所示。其中差动保护用 TA3、TA4、TA5 处电流量求取差动电流，而不平衡保护用 TA1 和 TA2 的差流作为不平衡量进行故障判别。这种配置差动保护存在死区，但是可以降低 CT 的绝缘要求，降低 CT 选型难度。除此之外目前也有不同的配置，如图 2 所示，其中差动保护用 TA1 和 TA3 求取差动电流，而不平衡保护直接用 TA2 的电流作为不平衡量进行故障判别，这样减少了 CT 数量，也提高了保护量的精度及准确度，消除了差动保护的死区，但是对 CT 的绝缘

要求较高^[19]。

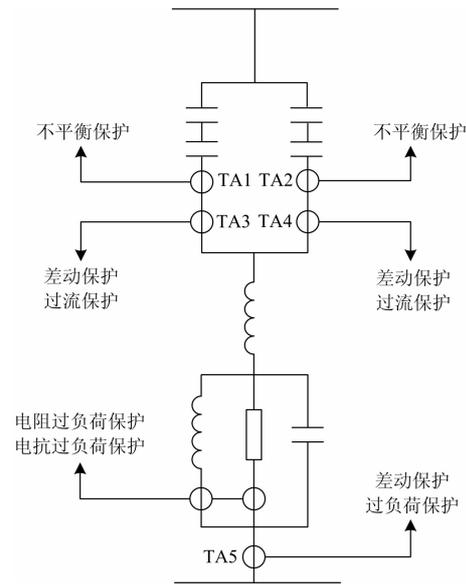


图 1 直流滤波器保护配置示意图
Fig. 1 Protection configuration of DC filter

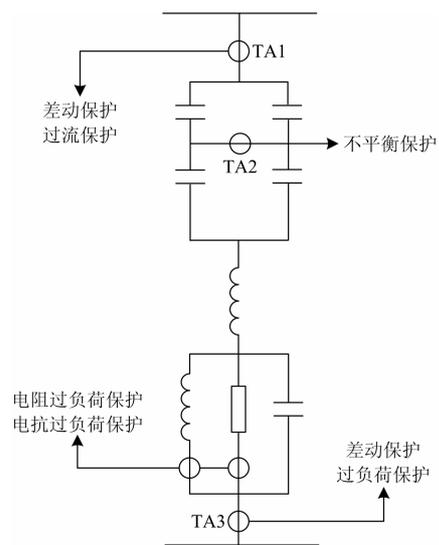


图 2 直流滤波器保护配置示意图
Fig. 2 Protection configuration of DC filter

1.2 直流滤波器保护特性分析

直流滤波器差动保护具有不受区外故障的影响，可以准确反映各种接地故障等优点，成为直流滤波器的主保护。

但是由于滤波器工作工况的特殊性，会使得差动的性能有所下降。以简单的差流计算为例，如式(1)所示，其中 I_s^{12} 为滤波器首端 12 次谐波电流向量值， I_M^{12} 为滤波器末端 12 次谐波电流向量值， I_{CD}^{12} 为 12 次谐波差动电流幅值。

$$|I_S^{12} + I_M^{12}| = I_{CD}^{12} \quad (1)$$

在滤波器发生接地故障, 流过滤波器末端电流为零时, 即 $I_M^{12} = 0$, 此时差动电流就为首端电流 I_S^{12} , 但由于滤波器故障后谐波阻抗发生变化, 滤波器调谐频率会发生偏移, 使得流过滤波器调谐频次的谐波电流减小, 即 I_S^{12} 变小, 因此滤波器差动电流 I_{CD}^{12} 也减小, 降低了差动保护的灵敏度。

同时由于滤波器中存在大量的电感电容储能元件, 当如图 3 中 F1 处发生接地故障时, 故障下方的电感电容与故障点会形成回路, 如图 4 所示, 进行能量泄放, 因此会有电流流过滤波器末端, 即式 (1) 中的 $I_M^{12} > 0$, 这使得差动电流 I_{CD}^{12} 会进一步减小, 降低差动保护的灵敏度, 当差动电流降到定值以下时, 差动保护会出现拒动, 无法切除故障。

随着滤波器接地故障向滤波器末端移动, 滤波器谐波阻抗变化减小, 滤波器调谐频率偏移逐渐减小, 首端流过的谐波电流也逐渐增大, 差动电流逐渐增大, 滤波器差动保护灵敏度逐渐提高, 因此在滤波器靠近首端故障时, 可能出现差动保护灵敏度不足, 无法切除故障。

为了保护直流滤波器电容配置了不平衡保护, 当电容发生不对称故障时会有不平衡电流, 当不平衡电流中的 3、6、12 次谐波电流任意两个达到定值保护动作, 对直流滤波器电容进行保护。但是当高压电容故障时, 直流滤波器谐波阻抗会发生变化, 调谐频率会发生偏移, 流过的谐波电流可能减小而且也不定会有 3 次和 6 次谐波电流, 故障特征与电容故障的程度有关, 难以确定。保护的可靠性有待考究, 因此该保护有一定的局限性。

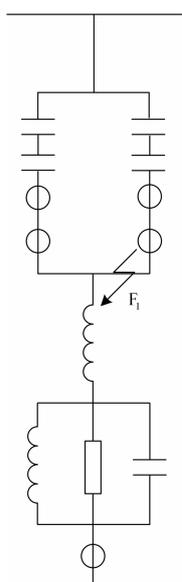


图 3 直流滤波器故障位置示意图

Fig. 3 Fault of DC filter

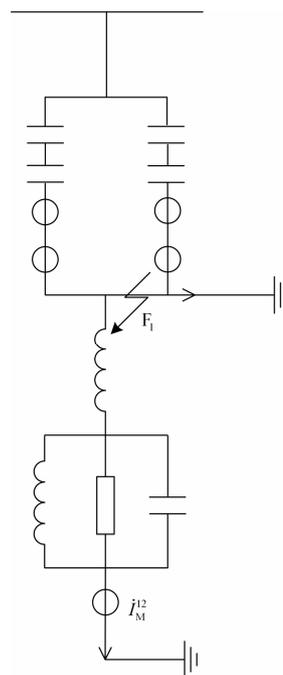


图 4 电能泄放回路示意图

Fig. 4 Fault loop of DC filter

通过对直流滤波器保护进行分析, 直流滤波器保护存在一定的缺陷, 保护灵敏度不足等问题使得目前配备的保护无法对直流滤波器进行全面的可靠地保护。

2 直流滤波器谐波阻抗保护分析

2.1 谐波阻抗保护原理

为了更加完善直流滤波器保护, 完善直流滤波器差动保护在靠近首端接地故障时灵敏度不足, 以及可以反应直流滤波器多种故障及失谐问题, 本文从滤波器的基本特征出发, 提出了直流滤波器谐波阻抗判据, 进一步完善了直流滤波器保护。

滤波器最基本的特征是在调谐频率下谐波阻抗最小, 因此当滤波器发生故障时, 滤波器在原来调谐频率下的谐波阻抗必定会增大, 以此特征作为保护判据, 通过判断直流滤波器调谐频率下的谐波阻抗大小来对滤波器进行保护。单调谐及多调谐滤波器谐波阻抗选取滤波器调谐频率中的较小频率, 这样可以降低保护量的采样频率, 节省保护装置资源。

根据直流滤波器谐波阻抗特征, 以 HP12/24 直流滤波器为例提出谐波阻抗保护判据如式 (2) 所示。

$$\left| \frac{U_F^{12}}{I_F^{12}} \right| > k_i Z_{12set} \quad (2)$$

式中: U_F^{12} 为直流滤波器首端 12 次谐波电压; I_F^{12} 为直流滤波器首端 12 次谐波电流; Z_{12set} 为 12 次谐波

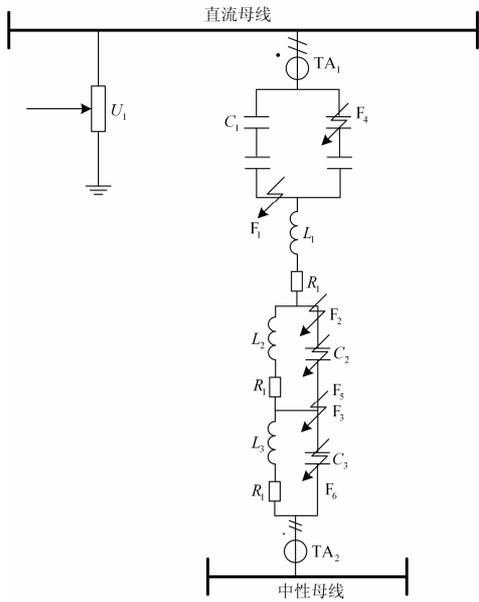


图 7 直流滤波器结构示意图

Fig. 7 Structural diagram of DC filter

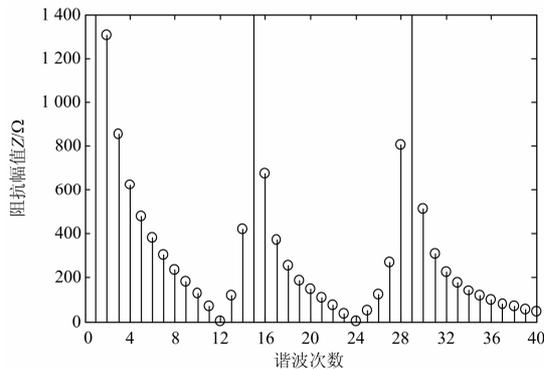


图 8 直流滤波器阻抗-频率特性

Fig. 8 Impedance-frequency characteristic of DC filter

仿真中直流滤波器为 HP12/24/45 三调谐滤波器，差动保护电流量选取 12 次谐波电流，谐波阻抗保护选取调谐频次较低频率的谐波阻抗，因此选取 12 次谐波阻抗。

直流滤波器可能故障位置与故障类型有多种，由于篇幅有限，本文以直流滤波器三处接地故障以及以三处元件故障为例进行仿真分析，具体故障位置如图 6 中所示的 F1、F2 和 F3 三处接地故障和 F4、F5 和 F6 三处元件击穿短路故障。

直流滤波器差动保护中差动电流由电流互感器 TA1 和 TA2 获取，12 次谐波阻抗由电压测量装置 U1 和电流互感器 TA1 求取，不同位置故障时差动电流和谐波阻抗值仿真结果如表 1 所示。直流滤波器额定电流为 $I_{12}=10\text{ A}$ ，直流滤波器额定谐波阻抗为 $Z_{12}=10\ \Omega$ 。

表 1 差流与谐波阻抗接地故障仿真结果

Table 1 Simulation results of differential current and harmonic impedance earth fault

故障位置	谐波差流/A	谐波阻抗/ Ω
F1	1.1	246
F2	1.4	189
F3	13.7	18.8

通过表 1 可知：当直流滤波器靠近首端发生接地故障时，滤波器调谐频率发生较大改变，流过滤波器的谐波电流减小，因此差动谐波电流很小，例如 F1 处接地故障时，差动电流小于额定电流的 10%，差动保护灵敏度较低，保护可能无法动作切除故障。

当直流滤波器靠近首端发生接地故障时，由于滤波器调谐频率的改变，滤波器在原有调谐频率下的谐波阻抗大大增加，例如 F1 处故障，谐波阻抗达到额定谐波阻抗的 25 倍左右，谐波阻抗保护灵敏度较高，可以迅速动作切除故障。随着故障位置往末端移动差动流逐渐增加，差动保护的灵敏度才逐渐增加。

当谐波阻抗保护中谐波阻抗定值取滤波器额定谐波阻抗，可靠系数取 1.2 时，谐波阻抗保护动作定值为 $12\ \Omega$ ，在不同的故障位置下进行仿真，分析谐波阻抗保护的動作结果。谐波阻抗保护在不同位置故障下的仿真结果如表 2 所示。

表 2 谐波阻抗保护仿真结果

Table 2 Simulation results of harmonic impedance protection

故障位置	谐波阻抗/ Ω	保护动作结果
F1	246	动作
F2	189	动作
F3	18.8	动作
F4	80	动作
F5	171	动作
F6	19	动作

通过表 2 可知：当直流滤波器在不同位置发生不同类型的故障时谐波阻抗保护都能够正确动作切除故障，对直流滤波器进行可靠的保护。

通过对表 1 和表 2 的仿真结果分析可知：差动保护在滤波器靠近首端故障时灵敏度较低，而谐波阻抗保护此时灵敏度最高，可以弥补差动保护的不足，而且谐波阻抗保护能够反映滤波器的各种故障，能够对滤波器进行较为全面的保护。

4 结语

本文对已有的直流滤波器保护进行了分析，指

出了目前配置保护的不足之处, 以此提出了能够改善现有保护不足之处的谐波阻抗保护判据, 并利用 PSCAD 软件进行建模和故障仿真, 通过仿真分析得到以下结论。

直流滤波器靠近首端发生接地故障时, 滤波器调谐频率发生改变, 滤波器谐波阻抗发生变化, 流过滤波器的谐波电流减小, 差动谐波电流很小, 差动保护灵敏度不足, 保护可能拒动, 而此时谐波阻抗变化较大, 远大于谐波阻抗保护定值, 保护灵敏度较高, 可以迅速动作切除故障。

随着故障位置向滤波器末端移动, 差动电流逐渐增加, 差动保护灵敏度逐渐升高, 谐波阻抗保护变化情况与之相反, 但谐波阻抗保护依然能够动作切除故障。因此谐波阻抗保护可以弥补差动保护在滤波器靠近首端故障灵敏度不足的问题, 更加完善直流滤波器保护, 对直流滤波器进行可靠的保护。

参考文献

- [1] 卢毓欣, 韩永霞, 朱志芳, 等. ± 1000 kV 特高压直流换流站绝缘配合[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 516-523.
LU Yuxin, HAN Yongxia, ZHU Zhifang, et al. The insulation and coordination of ± 1000 kV uhvdc converter station[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 516-523.
- [2] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research on HVDC protection value setting process[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [3] 赵毓君. 高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1-18.
- [4] 马俊民, 黄永瑞, 何青连. ± 800 kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37.
MA Junmin, HUANG Yongrui, HE Qinglian. Research on harmonics of ± 800 kV ultra high voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37.
- [5] 徐宏雷, 郑伟, 周喜超, 等. 特高压直流输电系统对电网谐波污染的仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 192-195.
XU Honglei, ZHENG Wei, ZHOU Xichao, et al. Simulation analysis of grid harmonic pollution affected by ultra high voltage direct current power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 192-195.
- [6] ZHANG Wenyan, ASPLUND G. Active DC filter for HVDC systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1994, 7(1): 40-44.
- [7] 黄银龙, 乐健, 毛涛, 等. 一种新型的高压直流输电系统直流侧谐波电压测量方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 144-152.
HUANG Yinlong, LE Jian, MAO Tao, et al. A novel measurement method of the harmonic voltage on the DC-side of HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 144-152.
- [8] PANG Hao, WANG Zanji, CHEN Jianye. Study on the control of shunt active dc filter for HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 396-401.
- [9] 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.
- [10] 任军辉, 张万荣, 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.
- [11] 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 HVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 46-51.
- [12] 罗汉武, 黄银龙, 姜国义, 等. 适用于单调谐滤波器的失谐元件在线辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 34-39.
LUO Hanwu, HUANG Yinlong, JIANG Guoyi, et al. Online identification method of detuning element of single-tuned filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 34-39.

- [13] 郑伟, 邬乾晋, 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, 2014, 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, 2014, 42(1): 139-144.
- [14] 程江平, 周全. 直流滤波器保护的研究和改进[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 105-109.
CHENG Jiangping, ZHOU Quan. Study and improvement of DC filter protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 105-109.
- [15] 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.
- [16] 田培涛, 黄金海, 吴庆范, 等. 直流滤波器保护关键问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 144-149.
TIAN Peitao, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Study on the key problems of DC filter protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 144-149.
- [17] 文继锋, 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.
WEN Jifeng, CHEN Songlin, LI Haiying, et al. DC filter protection in HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 69-72.
- [18] 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.
- [19] 李豹, 马业林, 熊双成, 等. ± 800 kV 特高压直流保护优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 71-75.
LI Bao, MA Yelin, XIONG Shuangcheng, et al. Research on optimization of ± 800 kV UHVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 71-75.

收稿日期: 2015-10-12; 修回日期: 2016-01-04

作者简介:

行武(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wu-xing@sac-china.com

郭晓(1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xiao-guo@sac-china.com

胡兵(1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: bing-hu@sac-china.com

(编辑 姜新丽)