

兴安直流 C1 不平衡保护采用计数方式的研究

郑伟, 邬乾晋, 周全

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要: 介绍了兴安直流近年发生的扰动导致 C1 不平衡保护误动作事件, 对扰动波形进行了分析。分析了兴安直流滤波器 C1 电容器结构特点, C1 不平衡保护原理和配置。对 C1 不平衡保护程序中至关重要的积分功能模块 INT 进行了分析。为避免 C1 不平衡保护再次误动作, 根据 C1 电容器不平衡故障的发展过程, 提出兴安直流 C1 电容器不平衡保护修改方案。动态段采用计数方式, 可以限制扰动对保护造成的影响, 避免误动。根据 C1 电容器不平衡故障造成的过电压水平, 在过电压可承受的范围安排不同的动作出口策略: 短路小串数较少, 过电压较低时告警出口; 短路小串数较多, 过电压较高时跳闸出口。

关键词: 兴安直流; 直流滤波器; C1 不平衡保护; 动态段; 计数方式

Research on the use of counting scheme in C1 unbalance protection in Xing-an HVDC project

ZHENG Wei, WU Qian-jin, ZHOU Quan

(Test & Maintenance Center, EHV Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: This paper introduces the maloperation of C1 unbalance protection caused by disturbance in Xing-an HVDC project in recent years and analyzes the disturbance waveform. The internal structure of DC filter C1 capacitor, the principle and configuration of C1 unbalance protection are analyzed. The function of integration module INT that is vital to C1 unbalance protection program is analyzed. To avoid the C1 unbalance protection maloperation again, according to the development process of C1 capacitor unbalance faults, a modification is proposed for C1 unbalance protection. In the modification, the dynamic segment uses counting scheme to limit the impact of disturbance on the protection and to avoid maloperation. According to the overvoltage level caused by the C1 capacitor unbalance faults, different action strategies are arranged in the acceptable range of overvoltage level. When the number of short-circuit small strings is small and the overvoltage level is relatively low, alarm strategy is adopted; when the number of short-circuit small strings is big and the overvoltage level is relatively high, trip strategy is used.

Key words: Xing-an HVDC; DC filter; C1 unbalance protection; dynamic segment; counting scheme

中图分类号: TM72; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0139-06

0 引言

高压直流输电技术在远距离大容量输电和电力系统联网方面有明显的优点, 近年来在我国发展迅速, 其可靠性的改善将给整个电力系统的安全、经济运行带来好处^[1-2]。直流保护是直流输电系统中最重要的功能之一, 直流保护系统的可靠性直接关系到设备的安全和电网的稳定^[3]。然而, 南方电网直流输电系统运行中, 却多次发生直流保护误动的事件。南方电网兴安直流投运以来, 发生多起扰动导致的直流滤波器 C1 不平衡保护误动作跳闸事件。从现场检查情况来看, 未发现电容器损坏或电气回路短路、放电等现象, 电容器桥臂处于平衡状态。

为解决扰动导致 C1 不平衡保护误动作的问题,

相关工程技术人员提出了相应的反措, 如为 C1 电容器不平衡保护动态段和静态段的正、负定值越限判据分别进行 800 ms 延时出口, 并于 2010 年进行了实施^[4]。反措取得了一定的效果, 但在 2012 年 5 月 12 日依然发生了 C1 不平衡保护误动作事件。5.12 事件所提取的 Trace 录波如图 1 所示, 扰动使得不平衡度采样值 ITD/ITS 超过了定值-30.30%, 且持续时间达到了延时定值 800 ms 以上, 最终 C1 不平衡保护动态段动作。

由此可见, 兴安直流 C1 不平衡保护依然存在误动作的风险。需要进一步研究 C1 电容器不平衡故障的机理, 完善 C1 不平衡保护原理。

本文介绍了兴安直流滤波器 C1 电容器结构特点, C1 不平衡保护原理和配置。对 C1 不平衡保护

程序中至关重要的积分功能模块INT进行了分析和仿真。根据 C1 电容器不平衡故障的发展过程及过电压水平^[5-6],提出 C1 电容器不平衡保护修改方案,通过动态段采用计数方式,可有效地限制扰动对保护造成的影响,避免误动。

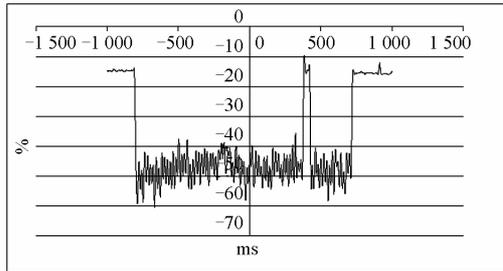


图 1 2012 年 5 月 12 日 ITD/ITS 录波图
Fig. 1 The ITD/ITS waveform on May 12, 2012

1 兴安直流C1 电容器结构及现有不平衡保护原理

1.1 C1 电容器结构及其特点

兴安直流工程各站每极各配置两组直流滤波器,型号为 TT 12/24/36。直流滤波器 C1 电容器共有 104 个电容器单元,结构为 52 串 2 并(两臂),如图 2 所示。

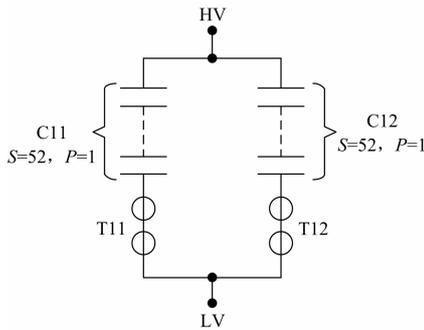


图 2 兴安直流滤波器 C1 电容器结构
Fig. 2 Structure of DC filter C1 capacitor

兴安直流 C1 电容器单个电容器单元由 72 个电容元件组成,每个元件带有熔丝保护,其结构为 18 并 4 小串,每一小串元件并接分布式均压电阻,如图 3 所示。每个元件的电容值为 9.244 444 μF ,每一小串元件的电容值为 166.4 μF ,每一个电容器单元的电容值为 41.6 μF ,单个桥臂的电容值为 0.8 μF ,整个 C1 电容器的电容值为 1.6 μF 。

当一小串并联的元件中某些元件击穿,同一小串中完好元件所存储的能量将通过击穿元件串接的熔丝放电,使熔丝熔断;当一小串并联的元件中剩余完好元件所存储的能量不足以熔断熔丝时,故障

发展为整小串元件短路^[7-9]。根据兴安直流工程直流滤波器保护研究报告,C1 电容器一小串并联的 18 元件中,熔丝熔断的极限为 8 个,C1 电容器内部元件故障将经历先断路后短路的过程^[10]。

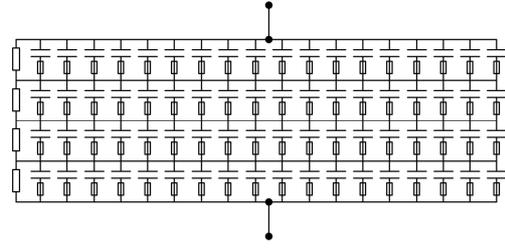


图 3 C1 电容器单个电容器单元内部结构
Fig. 3 Internal structure of a single capacitor unit

1.2 现有 C1 不平衡保护原理

C1 不平衡保护的任务:在 C1 电容器内部部分元件发生故障时退出直流滤波器,避免剩余完好元件承受过应力造成电容器雪崩损坏。通过检测流过 C1 电容器两臂的总电流 ITS 和不平衡电流(差电流)ITD,取 12 次(600 Hz)谐波量,计算判断 C1 电容器内部损坏程度,采取相应的动作后果。

C1 不平衡保护分为静态段和动态段,静态段反应 C1 电容器的不平衡度,动态段反应 C1 电容器不平衡度的变化量。实际程序中的判据如表 1 所示。

表 1 现有 C1 不平衡保护判据

Table 1 The existing criterion of C1 unbalance protection	
分段	判据
动态段	$ITD / ITS - \int ITD / ITS > 0.303 0$ 并延时 800 ms
	或 $ITD / ITS - \int ITD / ITS < -0.303 0$ 并延时 800 ms
静态段	$\int ITD / ITS > 0.679 61$ 并延时 800 ms
	或 $\int ITD / ITS < -0.679 61$ 并延时 800 ms

动作结果为: $ITS < 100 \text{ A}$ 时,退出该组直流滤波器; $ITS > 100 \text{ A}$ 时,相应极紧急停运,并退出该组直流滤波器^[11-12]。

2 积分功能模块INT功能的分析

在兴安直流 C1 电容器不平衡保护程序中,如图 4 所示,ITD/ITS 实时反应 C1 电容器的不平衡度,当 C1 电容器不平衡度发生变化后,ITD/ITS 立刻跟着发生变化,也就是发生突变。

无论是动态段或是静态段,都跟 $\int ITD/ITS$ 的计算相关。在保护程序中, $\int ITD/ITS$ 的计算由积分模块 INT 完成,对 C1 电容器不平衡度的变化进行跟随,当 C1 电容器不平衡度 ITD/ITS 发生突变后,经过一段时间的积分后, $\int ITD/ITS$ 的值将跟

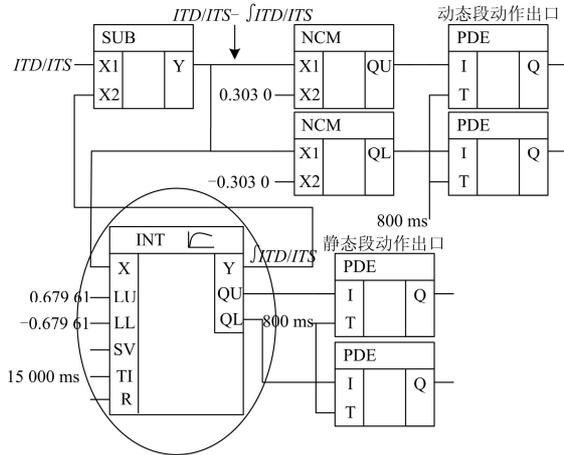


图 4 兴安直流 C1 不平衡保护程序

Fig. 4 Program of C1 unbalance protection

ITD/ITS 一致。积分模块 INT 的输入输出计算如式 (1), 在程序中具体为式 (2), 其中 $TA=1\text{ ms}$ 为模块采样中断时间。

$$Y_n = Y_{n-1} + \frac{TA}{TI} X_n \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (\int ITD/ITS)_n &= (\int ITD/ITS)_{n-1} + \\ &\frac{1}{15000} [(ITD/ITS)_n - (\int ITD/ITS)_{n-1}] \end{aligned} \quad (2)$$

通过数值仿真, 可以得到 C1 电容器不平衡度 ITD/ITS 发生突变后, $\int ITD/ITS$ 跟随变化的过程, 如图 5 所示, 其中 ITD/ITS 值由 0 突变为 1。积分时间为 800 ms 时, $\int ITD/ITS$ 的值为 0.052, 积分时间为 34 s 时, $\int ITD/ITS$ 的值为 0.9, 经过长时间的积分后, $\int ITD/ITS$ 才等于 ITD/ITS 。也就是说, 动态段判据 $ITD/ITS - \int ITD/ITS$ 的值在延时 800 ms 的时间内可等效于不平衡度 ITD/ITS 的变化量。并可以得到, 扰动导致直流滤波器 C1 不平衡保护误动作事件中, 为动态段动作。

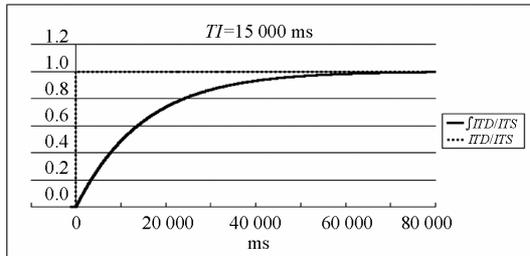


图 5 积分模块 INT 的数值仿真结果

Fig. 5 Simulation result of the integral module INT

3 兴安直流 C1 电容器不平衡故障分析

为完善 C1 不平衡保护方案, 需要进一步对 C1

电容器不平衡故障进行分析。

兴安直流 C1 电容器共有 104 个电容器单元, 结构为 52 串 2 并 (两臂)。单个电容器单元由 72 个电容元件组成, 其结构为 18 并 4 小串, 故兴安直流 C1 电容器单臂共有 $4 \times 52 = 208$ 小串。兴安直流 C1 电容器元件串有熔丝, 电容器内部故障发展过程为先断路后短路。一侧桥臂各小串元件先断路后短路的不平衡度及过电压分析如表 2 所示。另一侧桥臂小串元件发生不平衡故障时, 不平衡度变化量大小是一样的, 但符号相反, 可采用正负符号不同来区分两侧桥臂发生不平衡故障对总的的不平衡度的贡献^[13]。

表 2 C1 不平衡故障的不平衡度及过电压分析

Table 2 The unbalance degree and overvoltage level analysis in C1 unbalance faults

短路小串数	故障发展过程	不平衡度	不平衡度变化量	过电压倍数
1	先熔断	-0.191959303	-0.191959303	
	再短路	0.240963855	0.432923159	1.004830918
2	先熔断	0.048079225	-0.192884631	
	再短路	0.483091787	0.435012563	1.009708738
3	先熔断	0.289275122	-0.193816665	
	再短路	0.726392252	0.43711713	1.014634146
4	先熔断	0.53163678	-0.194755471	
	再短路	0.970873786	0.439237006	1.019607843
5	先熔断	0.775172671	-0.195701115	
	再短路	1.216545012	0.441372341	1.024630542
6	先熔断	1.019891349	-0.196653663	
	再短路	1.463414634	0.443523285	1.02970297
7	先熔断	1.265801451	-0.197613183	
	再短路	1.711491443	0.445689991	1.034825871
8	先熔断	1.5129117	-0.198579742	
	再短路	1.960784314	0.447872613	1.04
9	先熔断	1.761230903	-0.19955341	
	再短路	2.211302211	0.450071308	1.045226131
10	先熔断	2.010767954	-0.200534257	
	再短路	2.463054187	0.452286233	1.050505051

依据兴安直流滤波器保护研究报告, 直流滤波器 C1 不平衡保护定值整定原则为: 当一个电容器臂出现单个电容器单元内部一小串 18 个元件中 8 个元件熔丝熔断, 发展为同一小串元件短路的过程中产生的不平衡度乘以 0.7 倍的可靠系数, 得出 C1 不平衡保护的定值。如表 2 所示, 第一小串元件由断路发展为短路产生的不平衡度为 0.432 923 159,

乘以 0.7 倍的可靠系数得 0.303 0, 对应得到 C1 不平衡保护动态段的整定值为 30.30%^[14]。

兴安直流 C1 不平衡保护动态段定值整定存在以下的问题。

(1) 从表 2 可以看出, 任一小串元件发生故障, 由熔丝熔断发展到短路的过程中, 产生的不平衡度变化量均为 0.4 以上。第一小串元件短路故障后, 桥臂剩余完好的电容元件承受的过电压倍数为 1.004 83, 属于电容器可较长时间承受的范围。从过应力看, 第一小串元件短路故障后不应跳闸出口。

(2) 兴安直流 C1 不平衡保护动态段无法有效防止扰动导致的保护误动作。在直流系统的运行中, C1 电容器不平衡电流受交直流系统运行方式转换、开关分合闸、区外故障及频率的影响, 变化范围较大^[15]。根据历次 C1 不平衡保护误动作的 Trace 录波, ITD/ITS 的波动具有以下特点:

- (a) 扰动导致 ITD/ITS 波动值较大, 从百分之几十到百分之两百不等;
- (b) 扰动导致 ITD/ITS 波动方向不规则, 既有

在正负范围波动的情况, 也有偏向时间轴一侧的情况;

(c) 扰动导致 ITD/ITS 波动时间较长, 保护动作前波动持续的时间超过 1 s。

在扰动情况下, ITD/ITS 的波动将有可能导致动态段的误动作。2010 年进行的反措针对 ITD/ITS 值在正负范围变化的情况, 但无法应对图 1 所示的 ITD/ITS 值偏向时间轴一侧的情况, 需要对保护方案作进一步的完善。

4 C1 电容器不平衡保护修改方案

4.1 修改方案介绍

根据对 C1 不平衡保护误动作原因及不平衡故障过程的分析, 基于保护误动作时, 剩余完好元件过电压尚有较大裕度, 对 C1 电容器不平衡保护进行修改。动态段修改为计数方式, 静态段定值设定比动态段跳闸出口时的值稍高, 作为动态段的后备。修改后的 C1 不平衡保护配置如表 3 所示。

表 3 修改后的 C1 不平衡保护配置

Table 3 Modified configuration of C1 unbalance protection

分段	计数	不平衡定值	动作后果	不平衡度变化量	过电压倍数
动态段 (计数段)	1	$ITD/ITS - \int ITD/ITS > 0.303\ 0$ 并延时 800 ms 时, Counter Side 1 加 1;	告警	0.432 923 159	1.005 倍
	2	$ITD/ITS - \int ITD/ITS < -0.303\ 0$ 并延时 800 ms 时, Counter Side 2 加 1;	告警	0.435 012 563	1.010 倍
	6	计数每加 1, $\int ITD/ITS$ 立刻跃升为 ITD/ITS 的值。	跳闸	0.443 523 285	1.030 倍
静态段		采得不平衡度 $\int ITD/ITS > 1.8$ 或 < -1.8 并延时 800 ms。	跳闸	当出现 8 小串短路时静态段动作, 不平衡度为 1.960 784 314。	1.040 倍

4.2 改进方案的优点

动态段采用计数方式后, 每当发生一小串元件由部分断路发展为短路, 不平衡度发生变化时, 计数器加 1, 同时 INT 积分模块输出 $\int ITD/ITS$ 值立刻跃升, 等于 ITD/ITS 值, 跃升过程如图 6 所示。

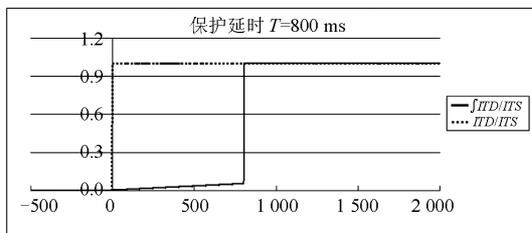


图 6 计数时刻 $\int ITD/ITS$ 值跃升过程

Fig. 6 The jump up of $\int ITD/ITS$ value at counting time

动态段采用计数方式, 不但可以具体反应两侧桥臂各自短路的小串数, 便于在过电压可承受的范围安排动作出口策略: 短路小串数较少, 过电压较低时告警出口; 短路小串数较多, 过电压较高时跳闸出口。

还可以限制扰动对保护造成的影响, 每次扰动造成的影响仅限于计数器加 1, 在短时间内连续发生多次扰动的情况较少, 可以有效地避免保护误动作。

静态段作为动态段的后备, 其不平衡定值设置较动态段跳闸出口时的值稍高, 为 8 小串, 而动态段跳闸出口为 6 小串。当动态段每次告警或动作后, 不但复归保护, 还对电容器进行检修, 使电容器两臂重新平衡, 则静态段没有动作的可能。当动态段每次告警或动作后, 尤其是告警后, 没能对电容器

进行检修,使电容器两臂重新平衡,则静态段有动作的可能。

5 结语

本文针对兴安直流近年发生的扰动导致的 C1 不平衡保护误动作事件,对波形特点进行了分析。为避免保护误动作的再次发生,研究了 C1 电容器结构特点、C1 不平衡保护原理和配置。重点分析了 C1 不平衡保护程序中至关重要的积分功能模块 INT,并进行了数值仿真。根据 C1 电容器不平衡故障的发展过程及其不平衡度和过电压水平,提出兴安直流 C1 不平衡保护修改方案:动态段采用计数方式,静态段定值设置较动态段跳闸出口时的值稍高,可有效地避免保护误动作。

参考文献

- [1] 曹涛,汲胜昌,吴鹏,等. 换流站电容器装置振动与噪声特性分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 87-92.
CAO Tao, JI Sheng-chang, WU Peng, et al. Vibration and noise characteristics for capacitor in HVDC converter station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 87-92.
- [2] 谢开贵,吴韬,黄莹,等. 基于二分法的高压直流输电系统可靠性最优分解[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 149-154.
XIE Kai-gui, WU Tao, HUANG Ying, et al. Reliability optimal distribution for HVDC systems using bisection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 149-154.
- [3] 李晓华,刘洋,蔡泽祥. 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 38-45.
LI Xiao-hua, LIU Yang, CAI Ze-xiang. Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 38-45.
- [4] 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 Jiang-ping, ZHOU Quan. Study and improvement of DC filter protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 105-109.
- [5] 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 Xi-lei, ZHOU Hao, WANG Dong-ju, 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.
- [6] 朱韬析,王宁宁,郭卫明,等. 交流滤波器电容器不平衡保护在南方电网直流输电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 102-105.
ZHU Tao-xi, WANG Ning-ning, GUO Wei-ming, et al. The application of the unbalance current protection for capacitor of AC filter used in the HVDC system of CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 102-105.
- [7] 余江,周红阳,赵曼勇. 高压电容器不平衡保护的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 85-89.
YU Jiang, ZHOU Hong-yang, ZHAO Man-yong. Related problems of unbalance protection for high voltage capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 85-89.
- [8] 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 Deng-hong, LI Yuan, XIN Jian-wei. High voltage capacitor bank unbalanced current protection of HP12/36 DC filter at Baoji converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(1): 19-22.
- [9] 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 Jin-hai, FENG Lei, LI Man-li, 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.
- [10] XJ-SIEMENS. Guizhou-Guangdong II line ±500 kV DC transmission project: DC filter protection study report[R]. 2005.
- [11] XJ-SIEMENS. Guizhou-Guangdong II line ±500 kV DC transmission project: DC filter protection C/P design

- specification[S]. 2005.
- [12] XJ-SIEMENS. Guizhou-Guangdong II line ± 500 kV DC transmission project: DC filter protection parameters and settings[S]. 2005.
- [13] 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 Yin-hong, 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.
- [14] 蔡永梁, 陈潜, 张楠朱, 等. 贵广直流工程直流滤波器保护算法改进及验证[J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 106-108.
- CAI Yong-liang, CHEN Qian, ZHANG Nan-zhu, et al. Improvement and validation of DC filter protection algorithm in Guizhou-Guangdong HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 106-108.
- [15] 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 Ge-lan, WEI Chun-zhi, WANG Gang. Failure analysis and protection of high voltage capacitor in three tuned DC filter[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 78-81.

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2013-05-14

作者简介:

郑伟(1985-), 男, 通信作者, 硕士, 主要从事直流输电系统控制保护工作; E-mail: 415340558@qq.com

邬乾晋(1986-), 男, 硕士, 主要从事直流输电系统控制保护工作;

周全(1984-), 男, 硕士, 主要从事直流输电系统控制保护工作。