

DOI: 10.7667/PSPC201790

特高压直流换流站分压器预试方法研究

邱进, 吴士普, 汪本进, 冯宇, 徐思恩

(中国电力科学研究院国网高压电气设备运行性能评估实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为保持特高压直流分压器良好状态, 以便发现问题及时处理, 每年定期需要对其进行预防性试验。目前试验方法拆、接引线需要耗费大量人力、物力, 既延长了停电时间, 又因经常拆接引线可能造成设备及人员安全问题。结合特高压站安装在极线、中性线上的直流分压器自身结构特点, 提出了不拆线测量高低压臂电容、分压比的试验方法, 并在某变电站预防试验时运用该方法进行了实际测试。试验结果与历年试验数据对比表明, 所提出的方法在保证测试有效性的前提下, 显著减少现场试验工作量。

关键词: 特高压; 直流换流站; 直流分压器; 预防性试验

Preventive test method research of UHV DC converter station DC voltage divider

QIU Jin, WU Shipu, WANG Benjin, FENG Yu, XU Sien

(SGCC Key Laboratory of High Voltage Equipment Operating Performance Evaluation Technology,
China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to maintain a good state of the UHV DC voltage divider so as to find out the problem in time, it is necessary to carry out a preventive test on it every year. It not only prolongs the outage time and may cause equipment and personnel safety problems due to often disconnecting lead. Combined with the structure characteristics of DC voltage divider itself installed on polar line and neutral line, this paper presents a test method of measuring high-low voltage arm capacitance and partial pressure ratio without removing lead, and uses the method to the actual test of preventive test of substation. Test results are compared with the test data over the years, and the results show that the proposed method can guarantee the test validity and reduce the workload of field test.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Development of Direct Current Measuring Device Test Method for DC Engineering".

Key words: UHV; DC converter station; DC voltage divider; preventive test

0 引言

目前, 中国已成为世界上直流输电工程数量最多、输送电压等级最高的国家^[1-3]。直流分压器是直流输电系统中不可缺失的重要设备, 承担着电能计量、电量监测、继电保护信号传送等重要作用。

换流站预防性试验和检修是设备运行和维护工作中一个重要环节, 其目的在于检查电气设备在长期运行中是否保持良好状态^[4-6], 以便发现缺陷及时处理, 是保证电气设备安全运行的重要措施^[7]。随着直流工程的建设, 直流分压器设备数量迅速增加,

设备每年定期进行预防性试验的工作负担越来越重。这些预防性试验, 大部分需要拆除引线, 特别是对于±800 kV 直流分压器设备来说, 因电压等级高, 试验时拆、接引线需要耗费的人力、物力更多, 既延长了停电时间, 又因经常拆接引线可能产生设备及人员安全问题。另一方面, 对电网可靠率要求也不断提高, 导致停电试验工期不断缩短, 这也就对电气试验的效率及数据可靠性提出了更高的要求。为缩短试验工作时间, 降低试验拆线工作带来的高劳动强度, 对分压器设备进行不拆线试验的需求也越来越大。为此, 开展直流分压器设备现场不拆线进行预防性试验的探索性研究工作将十分有意义。

本文结合±800 kV 特高压换流站直流场直流

基金项目: 国家电网公司科技项目“直流工程用直流测量装置试验方法研究和装置研制”

分压器的预防性试验, 开展直流电压分压器不拆引线预试方法研究, 以期在保证测试有效性的前提下, 减少现场试验的工作量, 完善其试验方法。

1 直流分压器原理与结构

直流工程中, 换流站直流场一次电压的重要设备——直流分压器, 用于直流线路电压监测和系统保护^[8-9]。习惯上称之为直流分压器的设备, 实际上的主体是一系列单元电阻元件串联而成的电阻分压器构成。为了防止直流电阻分压器受各种暂态过电压(包括雷电过电压)的影响, 通常在电阻分压器上, 并联均压电容器。图1为直流分压器电路原理图^[10]。

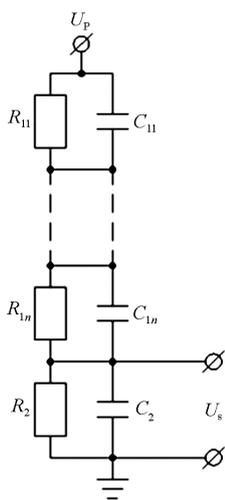


图1 直流分压器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DC voltage divider

根据电压等级的不同, 组成的电阻分压器和电容分压器级数不同, 图1中, 其中最下端的一级称之为低压臂(R_2, C_2), 之上若干级构成高压臂(R_1, C_1)。其中高压臂中的电阻 $R_1=R_{11}+R_{12}+R_{13}+R_{14}$, 高压臂电容 $C_1=C_{11} // C_{12} // C_{13} // C_{14}$ 。一次电压 U_p 作用于高压臂(R_1, C_1), 低压臂(R_2, C_2)输出电压 U_s 用于连接二次系统。

每一级的单元电阻电容元件(如 R_{11}, C_{11}), 有可能是多个更小的单元元件组成(如, $R_{11}=R_{111}+R_{112}+R_{113}+\dots+R_{11n}$, $C_{11}=C_{111} // C_{112} // C_{113} // \dots // C_{11n}$)。有的单元电阻元件采用网格模式绕制, 单元电阻是一个整体结构。

为了满足电阻分压器及其均压电容器的绝缘水平及其他电气、机械性能要求, 电阻分压器及其均压电容器被安置在空心绝缘子内部, 上部用法兰封装, 下部由基座封装并支撑^[11-12]。空心绝缘子内部充满绝缘介质(绝缘油或者绝缘气体), 如图2所示。

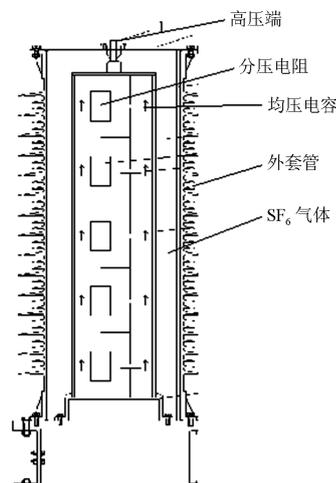


图2 直流分压器结构

Fig. 2 DC voltage divider structure

为使直流分压器更具有实用性, 直流输电工程中使用的直流分压器的二次一般进行了二次分压, 或者是多路二次输出^[13-14]。随着电力系统智能化的进展, 直流分压器的二次输出也有采用数字化、光纤化的输出接口。完整的直流分压器的电气连接原理^[15]见图3。

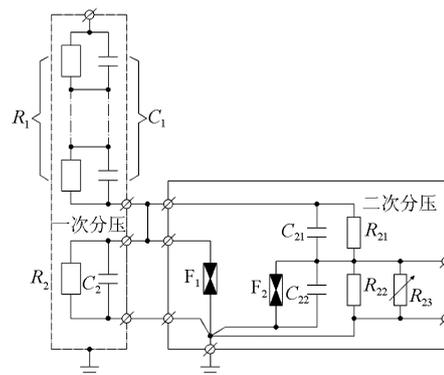


图3 直流分压器电气连接图

Fig. 3 Electrical connection diagram of DC voltage divider

2 拆引线测试方法

目前直流分压器预试普遍采用先拆除上端连接母线再进行相关试验的方式。极线上直流分压器与母线的连接多采用多股铝导线连接, 其现场拆卸和安装过程中高空作业工作量较大, 中性线上的直流分压器与中性线的连接采用的是单股导线连接, 其拆卸安装工作量相对较小。

2.1 分压比测量

拆除上端与直流分压器连接的母线后, 按照图4试验接线图所示接好试验线, 加压线悬空, 通过调压装置施加电压试验。

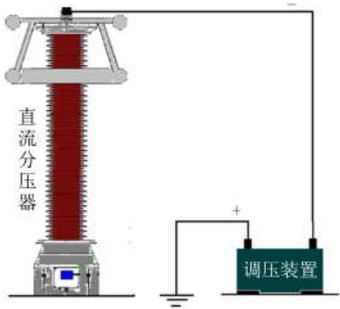


图 4 拆线直流分压器分压比测量

Fig. 4 Voltage ratio measurement of disconnecting DC voltage divider

2.2 高压臂电阻测量

拆除与直流分压器相连的上端母线后，按照图 5 所示试验接线图接好试验线，加压线悬空。高压臂电阻通过绝缘摇表得出，低压臂电阻直接通过万用表测量。

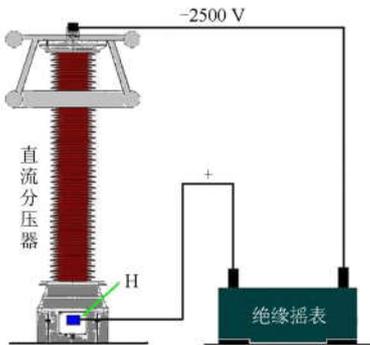


图 5 拆线直流分压器高压臂电阻测量

Fig. 5 Measurement of resistance of high voltage arm of disconnecting DC divider

2.3 直流分压器介损测量

拆除与直流分压器相连的上端母线后，按照图 6 试验接线图所示接好试验线，加压线悬空。按照

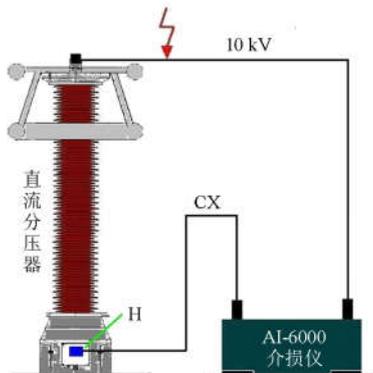


图 6 拆线直流分压器介损测量

Fig. 6 Dielectric loss measurement of disconnecting DC voltage divider

试验接线图接好试验线，加压线悬空。加压线接直流分压器高压端，CX 线接 H 端子。选择试验电压 10 kV。使用电容表测量低压臂电容。使用电动摇表测量高压臂电阻。使用万用表测量低压臂电阻。

3 不拆引线测试方法

在电力系统中，对电气设备进行直流电压分压器测试时，传统的方法都是拆掉该设备的高压引线后进行，以保证测试结果的准确性。在 ±800 kV 系统中再采用传统的方法拆除引线头进行试验则存在下列问题：导线截面较大，引线头很重，劳动强度很高，并且不容易拉开引线头与设备间的距离；反复拆装引线，易造成引线损伤和接触不良的隐患；高窄作业多，增加工作人员的安全风险；大量的时间耗费在拆、搭引线头上。

针对上述客观问题，根据相关原理及设备特性，在保证预试准确性的前提下，对 ±800 kV 换流站直流电压分压器设备不拆线预试方案进行分析。

3.1 高/低压臂电容量及介质损耗的测量

测试接线如图 7 所示，图中 C_h 表示高压端电容， C_g 表示低压端电容，虚线框中电路为电桥。将直流电压分压器上端母线接地，直流电压分压器低压端电容下端接地。介损测试仪用反接法，测出 C_h 、 C_g 并联后的总电容 C 及总介质损耗角正切值 $\tan \delta$ 。

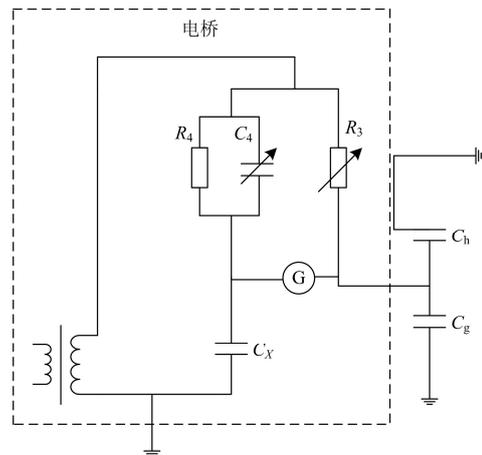


图 7 反接法测量 C_h/C_g 接线图

Fig. 7 Wiring diagram of measuring C_h/C_g using reverse connection method

高、低压端介质损耗角正切值分别用 $\tan \delta_h$ ， $\tan \delta_g$ 表示，则总电容量 C 为 $C_h + C_g$ ，总的介质损耗角正切值为

$$\tan \delta = (C_h \times \tan \delta_h + C_g \times \tan \delta_g) / (C_h + C_g) \quad (1)$$

通过变换则有

$$C_h = C - C_g \quad (2)$$

$$\tan \delta_h = (C \times \tan \delta - C \times \tan \delta_g) / (C - C_g) \quad (3)$$

上述试验结束后, 记录相关数据, 然后拆除 C_g 下端接地引线, 介损测试仪用正接法, 测出低压臂电容量 C_g 及介质损耗角正切值 $\tan \delta_g$, 如图 8 所示。

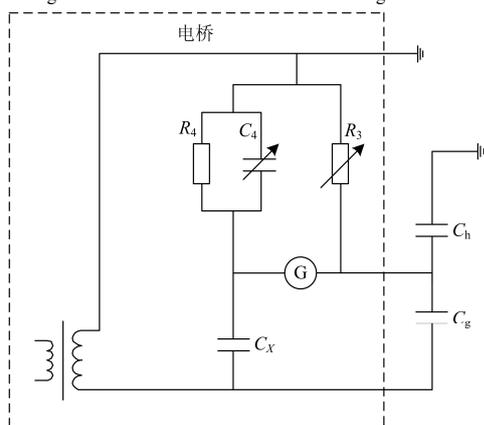


图 8 正接法测量 C_g 接线图

Fig. 8 Wiring diagram of measuring C_g using positive connection method

由于待测直流电压分压器一次母线接地, 使得电桥 R_3 桥臂上并联上电容 C_h 。忽略 C_h 的损耗, 根据电桥平衡原理, 可以求出:

$$C_g = \frac{C_N R_4 (1 + \omega^2 C_h^2 R_3^2)}{R_3 (1 + \omega^2 C_4 C_h R_3 R_4)} \quad (4)$$

$$\tan \delta_g = \frac{\omega C_4 R_4 - \omega C_h R_3}{1 + \omega^2 C_4 C_h R_3 R_4} \quad (5)$$

由于 $\omega C_4 R_4 \ll 1$; $\omega C_h R_3 \ll 1$, 所以上式可以简化为

$$C_g = \frac{C_N R_4}{R_3} \quad (6)$$

$$\tan \delta_g = \omega C_4 R_4 - \omega C_h R_3 \quad (7)$$

根据试验记录数据, 联立所列方程组, 即可得到相关参数的值。

试验开始前, 应依据各站待测直流电压分压器所在的一次侧主接线的具体情况, 合理操作相邻隔离开关、接地刀闸。要注意对二次分压电路的保护, 试验前最好拆除二次分压电路板接线以免在试验过程中损坏, 试验完成后要及时恢复接线。试验过程中待测直流分压器低压臂将承受一定的电压, 要确保该电压值未超过低压臂的耐受电压避免遭受损坏。

3.2 分压比的测量

为开展不拆线条件下直流电压分压器分压比的

测量, 须合理配置母线上的隔离开关和接地刀闸以提高试验准确度, 减小对其他设备的影响。当采用不拆线方法测量直流电压分压器的分压比时, 其试验接线图如图 9 所示。

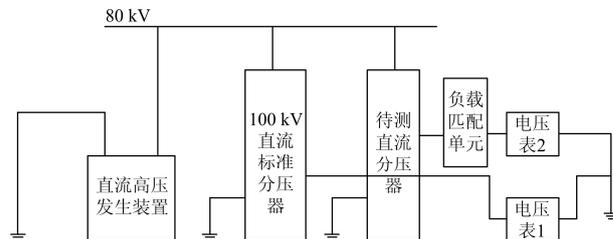


图 9 分压比测量电路

Fig. 9 Partial voltage ratio measuring circuit

图中直流高压发生装置产生 100 kV 的直流电压, 为了更准确地得到分压比, 将一校验合格准确度为 0.001 的 100 kV 直流标准分压器与待测直流电压分压器并联。为便于现场直接测量分压比, 参照相关直流分压器产品说明书设计阻抗匹配电路, 其输入端与待测直流分压器相连, 输出端连接用于比对的电压表。匹配电路的输出端和标准分压器的二次侧分别与同一型号校验合格的两块电压表相连 (也可以与测差装置相连)。通过电压表读数的比对, 能较准确地确定待测直流电压分压器的分压比。

4 不拆线预试结果及分析

4.1 中性线直流分压器

对中性线上 60 kV 直流分压器。考虑到中性线上直流分压器与母线的连接采用的是单根铝绞线, 拆除和恢复引线相对比较简单。对两台分压器在拆线和不拆线情况下分别采用正接法、反接法进行了高、低压电容的测量, 测量结果如表 1、表 2 所示。

某变电站采用的是正接法测量分压器高压臂电容。表 1 给出了本次采用正接法测得的中性线直流分压器高压臂电容的测量结果。与历年数据相比结果是比较接近的。表 2 中给出了采用反接法测量的高压臂电容值, 其与历年数据相比差异较大。

表 1 中性线直流分压器高压臂电容试验结果对比表

Table 1 Comparison of capacitance test results of high voltage arm of neutral line DC voltage divider

设备编号	额定电容量/ pF	2011 年正接法所测 高压臂电容量/ pF	2012 年正接法所测 高压臂电容量/ pF	本次正接法测得高 压臂电容 值/pF	本次不拆 线反接测 得高压臂 值/pF
P1-WN-T1	200	260.7	260.3	236.6	307.9
P2-WN-T1	200	262.3	264.3	238.5	300.3

表 2 中性线直流分压器低压臂电容试验结果对比表

Table 2 comparison test results of low voltage arm capacitor of neutral line DC voltage divider

设备编号	低压臂额定电容值/nF	2011 年所测低压臂电容值/nF	2012 年所测低压臂电容值/nF	本次
P1-WN-T1	200	209	222	222.4
P2-WN-T1	200	209	223	224.9

4.2 极线直流分压器

依照试验方案对极线上 800 kV 直流分压器进行了不拆线试验方法研究, 试验结果如下。

本次及近年高压臂电容值如表 3 所示。

表 3 极线直流分压器高压臂试验结果对比表

Table 3 Comparison test results of high voltage arm of polar DC voltage divider

设备编号	额定高压臂电容值/pF	2011 年正接法所测高压臂电容值/pF	2012 年正接法所测高压臂电容值/pF	本次不拆线反接法测量值/pF
P1-WP-T1	400	420.3	405.2	414.1
P2-WP-T1	400	419.4	403.3	429.8

表 3 给出了某变电站 2011 年、2012 年参考试验数据与本次试验结果的对比。

表 4 给出了极线上直流分压器本次采用不拆引线反接法测量高压臂电容的结果, 与 2011 年、2012 年采用正接法测量结果的对比, 其测量结果的产生差异原因与中性线直流分压器试验结果差异原因相同, 也是由于采用正接、反接测量方法, 杂散电容等因素对电桥的影响大小不同造成。

表 4 极线直流分压器低压臂试验结果对比表

Table 4 Comparison test results of low voltage arm of polar DC voltage divider

设备编号	额定低压臂电容值/nF	2011 年测量值/nF	2012 年测量值/nF	本次测量值/nF
P1-WP-T1	8350	8320	8460	8286
P2-WP-T1	8350	8310	8506	8278

5 结论

中性线直流分压器开展采用不拆线正接法测量高压臂电容的数据与历年试验数据相比偏差较小。

极线上直流分压器开展了不拆线试验方法研究, 由于低压臂电容较大, 超过了现场介损仪的量程, 可采用电容表测量低压臂电容。考虑杂散电容等因素对电桥的影响, 采用不拆线反接法测量高压臂电容的数据偏差较大, 建议采用该方法时应参考极线直流分压器在母线上的位置, 对极线上的隔离开关和接地刀闸进行合理操作, 人为断开与其他设备的连接, 提高测量准确度。

参考文献

[1] 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.

[2] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬, 等. ± 800 kV 特高压直流输电控制保护系统分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3277-3283.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Discussion of ± 800 kV UHVDC transmission control and protection system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 38(12): 3277-3283.

[3] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.

[4] 陶瑜, 马为民, 马玉龙, 等. 特高压直流输电系统的控制特性[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-4.
TAO Yu, MA Weimin, MA Yulong, et al. Control characteristics of UHVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 1-4.

[5] 全冰冰. 特高压直流输电线路快速保护研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
TONG Bingbing. Fast protection study of UHVDC power transmission system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[6] 邓旭. 特高压直流及柔性直流输电系统换流站绝缘配合研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
DENG Xu. Research on insulation coordination for converter stations of UHVDC and VSC-HVDC transmission project[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[7] SINGHASATHEIN A, PRUKSANUBAL A, TANTHANUCH N, et al. Dielectric Strength of Breakdown voltage of nitrogen and carbon-dioxide[C] // 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, May 15-17, 2013, Krabi,

- Thailand: 1-5.
- [8] LI Fengqi, SHE Zhengqiu, LOU Dianqiang. Fault analysis of DC voltage divider in Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3244-3248.
- [9] 周雪青, 郝晓光, 张岩坡, 等. 基于分段拟合算法的电流互感器误差研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 139-143.
- ZHOU Xueqing, HAO Xiaoguang, ZHANG Yanpo, et al. Research on the error of current transformer based on subsection fitting algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 139-143.
- [10] 彭卉, 邹舒, 付永生, 等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
- PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 54-61.
- [11] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
- SONG Xuankun, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.
- [12] 王玲, 冯宇, 邱进, 等. 电压互感器谐波特性测量用可控谐波电压源的构建[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 106-111.
- WANG Ling, FENG Yu, QIU Jin, et al. Construction of controllable harmonic voltage source for harmonic characteristic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 106-111.
- [13] 冯宇, 王晓琪, 陈晓明, 等. 电容式电压互感器电路参数对电网谐波电压测量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4968-4975.
- FENG Yu, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. Influences of circuit parameters of capacitor voltage transformer on grid harmonic voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4968-4975.
- [14] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-159.
- LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-159.
- [15] 张侃君, 戚宣威, 胡伟, 等. YD 型换流变三角形绕组 CT 饱和对直流保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 99-105.
- ZHANG Kanjun, QI Xuanwei, HU Wei, et al. Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 99-105.

收稿日期: 2017-06-30; 修回日期: 2017-09-27

作者简介:

邱进(1981—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事高压电器技术研究。Email: qiujin@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)