

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.007

1 000 kV特高压断路器回路电阻测量方法的改进

李 洋¹, 王俏华², 徐 楠¹, 陆 云¹

(1. 国网上海市电力公司检修公司, 上海 201204; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 特高压检修存在着技术难度高、参考案例少、检修经验无等困难,特别是断路器回路电阻的测量,其可靠性直接关乎特高压设备的安全运行。为了寻找最佳的测量方案,为今后的特高压检修工作提供参考经验。文中依托1 000 kV特高压练塘站的首次检修,分别采用传统的单相直流电压降法、改进后的三相直流电压降法和不拆头带接地点测量法,使用两种仪器对两种1 000 kV断路器分别试验采样,对比标准值和出厂值发现,采用三相直流电压降法可以便捷、可靠地判断出断路器回路电阻值的合格与否,如需精确地定量分析还需采用单相直流电压降法进行复测。

关键词: 特高压; 断路器; 回路电阻

Improvement of the Loop Resistance Measurement for 1 000 kV UHV Circuit Breaker

LI Yang¹, WNAG Qiaohua², XU Nan¹, LU Yun¹

(1. State Grid Shanghai Maintenance Company, Shanghai 201204, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: UHV maintenance encounters the difficulties in technology, examples and experience. Especially, the measurement reliability of circuit breaker loop resistance directly relates to safe operation of UHV equipment. In this study, conventional single-phase DC voltage drop method, the improved three-phase DC voltage drop method, and the measurement without removing the headband ground were applied to the first maintenance overhaul of 1 000 kV UHV equipment in Lian Tang Power Station. Two kinds of 1 000 kV circuit breakers were sampled and tested by two instruments, respectively, and the comparison between the standard and delivery values indicates that the three-phase DC voltage drop method can conveniently and reliably judge whether the loop resistance value of a circuit breaker meets standard or not, while the single-phase DC voltage drop method can be used for accurately quantitative analysis.

Key words: ultra-high voltage; circuit breaker; loop resistance

0 引言

皖电东送工程是世界上首个投入商业运行的特高压交流同塔双回输电工程。作为这条特高压线路的终点站,练塘变电站在部分设备仍在运行状态下检修也属全国首次,因此检修过程中缺乏参考经验。而断路器回路电阻的测量是特高压检修中必不可少的一项试验内容。

普通的GIS通过断开两侧接地开关测量回路电阻^[1],而此次特高压断路器采用双断口GIS设备,体积较大,相邻断路器在运行状态,通过感应电测

试发现,被测断路器两侧的隔离开关有500 V左右的感应电,如果按传统方法测试,对设备和人身安全产生极大的威胁。其次,2014年练塘首检是国内特高压首次商业运行后停电检修,没有统一的测试方法和经验。如何寻找一种安全、可靠、简易的特高压断路器回路电阻测试方法就显的尤为迫切。

文中就以此次1 000 kV练塘特高压首检为例,现场采用常规的单相直流电压降法进行常规测试,再采用改进的三相直流电压降法和不拆头带接地点测量法进行测量,结合现场作业条件和测量数据,对比分析,探寻出安全可靠、精确度高、灵活方便的测试策略,为今后的特高压检修工作提供参考经验。

1 特高压断路器回路电阻构成

1 000 kV 特高压 SF₆ 断路器的组成见图 1^[2-3], 主要是主体灭弧装置、合闸电阻、合闸电阻开断储能器、传动系统和大功率液压弹簧操动机构等 5 大部分。其中主体灭弧装置由 2 个完全一样的灭弧单元串联而成, 每个灭弧单元并联均压电容; 合闸电阻与合闸电阻开关串联后再与主体灭弧装置并联; 分合闸时, 操动机构带动 2 个灭弧动触头, 并且通过传动系统带动合闸电阻开关的动触头来完成分合闸操作。

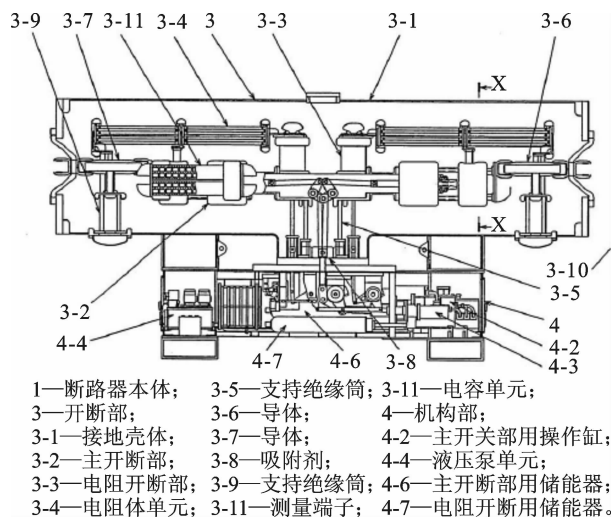


图 1 练塘特高压断路器结构

Fig. 1 Liantang UHV circuit breaker structure

由于 GIS 设备属于全密封设备, 无法测量动静触头之间的接触电阻。而回路电阻主要由 3 部分组成, 分别是导体本身电阻、固定连接电阻和活动连接电阻, 其中导体本身电阻和固定连接电阻一般是恒定的, 而连接处的接触电阻受接触方式、接触压力、接触表面的状态等因素的影响, 其值往往会发生变化, 接触电阻值远远大于前两者的电阻值。所以对断路器回路电阻的测量可以反映出断路器触头的接触电阻。因此在工程实践中, 通过测量 GIS 两侧接地开关之间的回路电阻, 判断触头的使用状况和可靠性。

2 单相直流电压降法

单相直流电压降法^[4-12]是目前最精确也是最普遍的方法。其原理就是在被测接触设备两端通直流电, 则会在被测设备接触部位产生电压降, 测量出该直流电流和被测回路上的电压降, 就可以通过欧姆定律计算出设备的直流接触电阻 $R=U/I$ 。单相直流电压降法简易接线图见图 2。

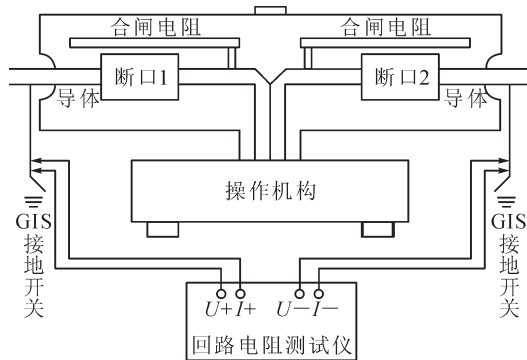


图 2 单相直流电压降法简易接线图

Fig. 2 Simplified wiring diagram of single-phase DC voltage drop method

如图 2 所示, 因为 GIS 是封闭性组合电器, 无法将将试验仪器的测试线直接接在断口两端, 利用断路器两侧的接地开关作为电流回路。为了避免试验仪器和开关型号的影响, 分别使用 YTC5501-100 和 HLDZ-2218B 两种回路电阻仪, 对河南平高 ZF27-1100(L)型和 LW61-1100 型进行测试。试验时, 将两侧的接地开关与接地排断引, 并且将断路器操作到合闸位置, 把回路电阻测试仪的试验线分别接在断路器两侧的接地开关上, 这样就可以形成试验回路。单相直流电压降法测 T041、T042 开关结果见图 3、4。

变电站名称:1 000 kV特高压练塘站 设备名称:安塘线T041开关 产品厂家:河南平高 型号:ZF27-1100(L) 试验日期:2014年9月5日 天气:晴 温度:30℃ 湿度:49% 单位:μΩ						
起点	终点	相位	标准	出厂值	回路电阻仪 5501	回路电阻仪 2218
安塘线/ T04127 接地 开关	安塘线/ T04117 接地 开关	A	115~195	159	176	172
		B	115~195	145	158	149
		C	115~195	137	151	144

图 3 单相直流电压降法测 T041 开关

Fig. 3 Single-phase DC voltage drop method to measure the T041 switch

3 三相直流电压降法

三相直流电压降法基本原理与单相直流电压降法相同, 只是改变了接线和测量方式, 通过对测得的试验数据进行数学求解, 最终获得断路器每相的接触电阻。

测 R_A+R_B 电阻的简易接线图见图 5。开关调至近控, 将开关合闸。拆除开关一侧接地开关的接地

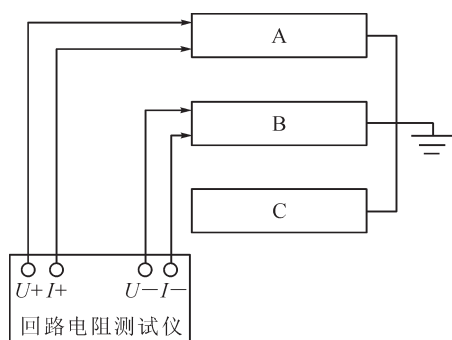
变电站名称:1 000 kV特高压练塘站 设备名称:安塘线/4号主变T042开关 产品厂家:河南平高 型号:LW61-1100 试验日期:2014年9月5日 天气:晴 温度:30℃ 湿度:49% 单位:μΩ						
起点	终点	相位	标准	出厂值	回路电阻仪 5501	回路电阻仪 2218
安塘线/4号主变T04227接地开关	安塘线/4号主变T04217接地开关	A	90~105	121	176	135
		B	90~105	125	158	133
		C	90~105	137	125	133

图4 单相直流电压降法测 T042 开关

Fig. 4 Single-phase DC voltage drop method to measure the T042 switch

排与 GIS 汇流排的引线,不让此接地开关接地(注意拆除的不是半幅带电侧隔离开关处的接地开关,而是非半幅带电侧隔离开关处的接地开关),如图 5 将回路电阻仪一头接 A 相一侧,一头接 B 相一侧,A 相和 B 相的另一侧则通过接地开关接地,大地作为回路,则测出的是 R_A+R_B 的电阻。同理再接 A 相和 C 相测出 R_A+R_C ,再接 B 相和 C 相测出 R_B+R_C ,最后解一个三元一次方程(1)解得 R_A 、 R_B 、 R_C 。

$$\begin{cases} R_A+R_B=\text{第 1 次数据} \\ R_A+R_C=\text{第 2 次数据。} \\ R_B+R_C=\text{第 3 次数据} \end{cases} \quad (1)$$

图5 测 R_A+R_B 电阻的简易接线图Fig. 5 Simple wiring diagram measured R_A+R_B resistance

最终求得的数据见图 6、7。

4 不拆头带接地点测量法

不拆头带接地点测量法是指不用拆除断路器两侧接地开关的接地排与 GIS 汇流排的引线,让此接地开关接地,保持检修时的安全状态。其基本的原理也是基于直流压降法,只是改变了接线和测量方式,通过两次测量,计算出断路器断口的接触电阻,见图 8。

试验步骤 1:断路器处于分闸位置,两侧的隔离

变电站名称:1 000 kV特高压练塘站 设备名称:安塘线T041开关 产品厂家:河南平高 型号:ZF27-1100(L) 试验日期:2014年9月5日 天气:晴 温度:30℃ 湿度:49% 单位:μΩ						
起点	终点	相位	标准	出厂值	回路电阻仪 5501	回路电阻仪 2218
安塘线/T04127接地开关	安塘线/T04117接地开关	A	115~195	159	183	180
		B	115~195	145	169	165
		C	115~195	137	162	159

图6 三相直流电压降法测 T041 开关

Fig. 6 Three phase DC voltage drop method to measure the T041 switch

变电站名称:1 000 kV特高压练塘站 设备名称:安塘线/4号主变T042开关 产品厂家:河南平高 型号:LW61-1100 试验日期:2014年9月5日 天气:晴 温度:30℃ 湿度:49% 单位:μΩ						
起点	终点	相位	标准	出厂值	回路电阻仪 5501	回路电阻仪 2218
安塘线/4号主变T04227接地开关	安塘线/4号主变T04217接地开关	A	90~150	121	143	140
		B	90~150	125	140	138
		C	90~150	125	142	140

图7 三相直流电压降法测 T042 开关

Fig. 7 Three phase DC voltage drop method to measure the T042 switch

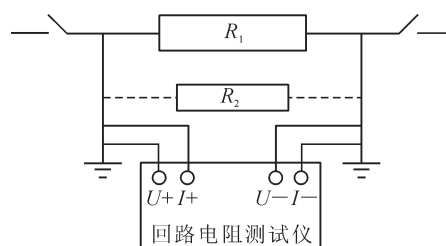


图8 不拆头带接地点测量的简易接线图

Fig. 8 Simple wiring diagram of the measurement without removing the headband ground

开关也在分闸位置,接地开关在合闸位置,保持最初的安全措施。将回路电阻仪两端接在断路器两侧的接地开关,测量出接地开关及接地网的回路电阻 R_2 。

试验步骤 2:将断路器就地操作到合闸位置,两侧的隔离开关在分闸位置,接地开关仍然在合闸位置,保持最初的安全措施。将回路电阻仪两端接在断路器两侧的接地开关,此时构成两个回路,测得

的是断路器断口接触电阻 R_1 与接地网电阻 R_2 的并联 R 。

最后求出断路器接口的接触电阻 $R_1 = RR_2 / (R_2 - R)$ 。

然而对于接地网的电阻 R_2 , 其值可能大也可能小。回路电阻仪 YTC5501-100 的量程为 $1 \sim 1\,999 \mu\Omega$, HLDZ-2218B 的量程为 $10 \mu\Omega \sim 20 \text{ m}\Omega$ 。当 $R_2 < 2\,000 \mu\Omega$ 时, R 和 R_2 都可以由回路电阻仪直接测得, 带入求解方程中即可求出断路器断口的接触电阻 R_1 。当 $R_2 \geq 2\,000 \mu\Omega$ 时, 完全可以忽略接地网电阻 R_2 对断路器断口接触电阻 R_1 的影响。不拆头带接地点法测 T041、T042 开关结果见图 9、10。

变电站名称:1 000 kV特高压练塘站 设备名称:安塘线T041开关 产品厂家:河南平高 型号:ZF27-1100(L) 试验日期:2014年9月5日 天气:晴 温度:30℃ 湿度:49% 单位: $\mu\Omega$						
起点	终点	相位	标准	出厂值	回路电阻仪 5501	回路电阻仪 2218
安塘线/ T04127 接地 开关	安塘线/ T04117 接地 开关	A	115~195	159	170	168
		B	115~195	145	150	144
		C	115~195	137	142	140

图 9 不拆头带接地点法测 T041 开关

Fig. 9 Without removing the headband ground drop method to measure the T041 switch

变电站名称:1 000 kV特高压练塘站 设备名称:安塘线/4号主变T042开关 产品厂家:河南平高 型号:LW61-1100 试验日期:2014年9月5日 天气:晴 温度:30℃ 湿度:49% 单位: $\mu\Omega$						
起点	终点	相位	标准	出厂值	回路电阻仪 5501	回路电阻仪 2218
安塘线/ 4号主变 T04227 接地 开关	安塘线/ 4号主变 T04217 接地 开关	A	90~150	121	134	133
		B	90~150	125	132	130
		C	90~150	125	133	130

图 10 不拆头带接地点法测 T042 开关

Fig. 10 Without removing the headband ground drop method to measure the T042 switch

5 结果分析

将试验所得的数据进行柱状图比较, 见图 11~14。

为了避免仪器和断路器型号造成的试验误差, 使用了两种型号的回路电阻仪, 测量了两种不同型

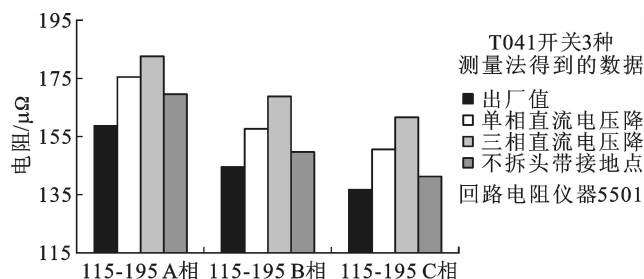


图 11 回路电阻仪 5501 测 T041 开关

Fig. 11 Loop resistance measuring instrument 5501 to measure the T041 switch

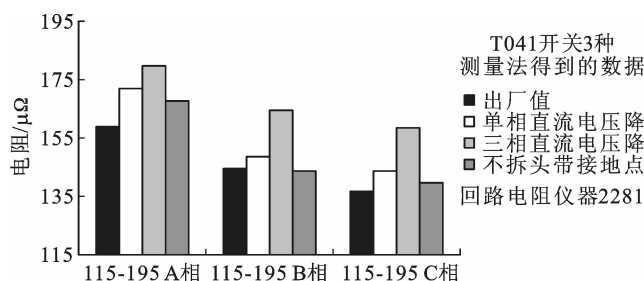


图 12 回路电阻仪 2218 测 T041 开关

Fig. 12 Loop resistance measuring instrument 2218 to measure the T041 switch

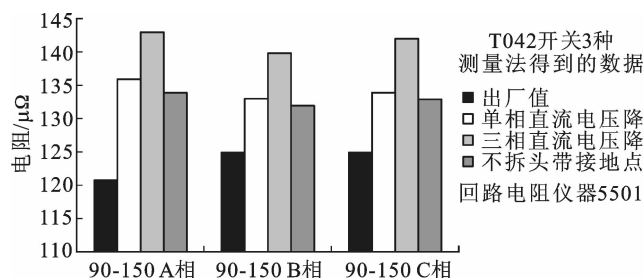


图 13 回路电阻仪 5501 测 T042 开关

Fig. 13 Loop resistance measuring instrument 5501 to measure the T042 switch

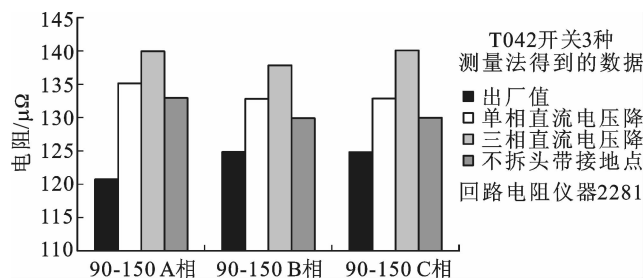


图 14 回路电阻仪 2218 测 T042 开关

Fig. 14 Loop resistance measuring instrument 2218 to measure the T042 switch

号的特高压断路器。分别使用单相直流电压降法、三相直流电压降法和拆头带接地线法进行测试。

由图中可以看出, 3 种方法测得的试验数据都比出厂值高出 5%~18%, 造成差值的原因主要是试验环境不同, 如接地端氧化、试验仪器差异、现场接

线情况等。但是测量值都在标准范围之内,不影响断路器的正常使用。

6 结论

1)单相直流电压降法在其他电压等级 GIS 的测试中较为精确,较为成熟,所以在特高压断路器检修作业指导书中使用的是该方法,该方法最精确^[13-17]。缺点是要拆除两侧的接地开关引线,由于此次练塘特高压检修是在部分设备停电的状态下进行,断路器一侧的隔离开关是半副刀带电,同时现场存在强大的感应电,如果拆除两侧接地开关,特别是半副带电隔离开关处的接地开关,对设备和人身安全具有极大威胁。其次,由于特高压 GIS 体积较大,回路电阻测试仪两侧线夹要有足够的长度才能夹在 GIS 两侧的接地开关处,不便于现场实施。如果增加试验线会对试验结果造成很大的影响。

2)三相直流电压降法测得的数据较单相直流电压降法高出 4.4%。造成这一偏差的原因主要是测量利用了接地回路,测试值中包含了接地排的电阻,但是试验数据还是在标准范围之内。三相直流电压降法优点是缩小了测量范围,将拆除接地点的数量减小了一半,只拆除了全部停电侧的接地开关,保留了半幅刀带电侧的接地开关,降低了临近运行设备感应电的威胁。其次,根据检修导则,断路器还要进行时间机械特性的测试,也需拆除一侧接地开关,选择三相直流电压降法进行测试,既不需要很长的测试线,在拆除一侧接地开关引线测试后,还可直接做时间机械特性试验,大大提高了工作效率,便于现场工作。

3)不拆头带接地线法测试较为简单,只需在断路器两侧接地开关接好测试线后分、合一次开关就可以完成测试,简易灵活,还不用改变安全措施。但是该方法测试出的电阻值较单相直流电压降法低了 5%,如果仅凭此方法进行测试,试验数据虽然在标准范围内,但是不能保证设备的真实数据也在标准范围内,容易造成误判断。其次该方法同样需要足够长的测试线,现场仪器很难满足。

在特高压断路器部分设备停电检修时,采用改进后的三相直流电压降法进行测试,如果测试值在标准范围之内,则确保断路器可正常运行,如果测试值大于标准值,则再采用单相直流电压降法进行复测。

参考文献:

[1] 陈俊,黄晓英,曹作群,等. 高压开关导电回路电阻测

量方法的研究[J]. 电测与仪表,2008,45(8):24-25.

CHEN Jun, HUANG Xiaoying, CAO Zuoqun, et al. Measurements study on the resistances in high-voltage switch contactor circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(8): 24-25.

[2] 刘晓明,孙宝龙,王尔智. 双断口结构对特高压 SF₆ 断路器电场分布的影响分析[J]. 高电压技术,2014,40(6): 1795-1801.

LIU Xiaoming, SUN Baolong, WANG Erzhi. Analysis of double fracture structure influence on extra high voltage SF₆ circuit breaker of the electric field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1795-1801.

[3] 裴振江,姚斯立,何俊佳,等. 一种新的特高压断路器合成试验回路[J]. 中国电机工程学报,2007,27(33):65-69.

PEI Zhenjiang, YAO Sili, HE Junjia, et al. A new synthetic test circuit for UHV circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 65-69.

[4] 李树兵,孔文,王龙龙. GIS 户外长管母回路电阻测试方法[J]. 能源与节能,2014(4):17-19.

LI Shubing, KONG Wen, WANG Longlong. Test methods of long pipe parent circuit resistance GIS outdoor[J]. Energy and Energy Conservation, 2014(4): 17-19.

[5] 丁玉柱. 500 kV 断路器回路电阻故障查找分析[J]. 电工技术,2014(5):55-56.

DING Yuzhu. Find analysis 500 kV circuit breaker fault loop resistance[J]. Electric Engineering, 2014(5):55-56.

[6] 徐鹏,郑树青,肖敏. 断路器主回路电阻测试结果受试验电流影响的分析[J]. 华东电力,2012(11):2017-2019.

XU Peng, ZHENG Shuqing, XIAO Min. Analysis of circuit breaker main loop resistance test results by the test current effect[J]. East China Electric Power, 2012(11):2017-2019.

[7] 高飞. 开关回路电阻智能测试研究[D]. 大连:大连理工大学,2003.

GAO Fei. Research on intelligent switch circuit resistance test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.

[8] 霍凤鸣,李媛媛,李英锋. 高压断路器智能回路电阻测试仪的设计和应用[J]. 河北电力技术,2011(5):1-2.

HUO Fengming, LI Yuanyuan, LI Yingfeng. Design and application of intelligent high voltage circuit breakers testing instrument[J]. Hebei Electric Power, 2011(5):1-2.

[9] 吴仁泽,江海涛,卜京. 一种 3/2 接线方式下的开关设备回路电阻评估方法研究[J]. 电工电气,2015(2):5-8.

WU Renze, JIANG Haitao, BU Jing. Research on evaluation method of switchgear circuit resistance of a 3/2 connection mode of[J]. Electrotechnics Electric, 2015(2):5-8.

[10] 张明,周惠安,刘文革,等. 日月山 750 kV 变电站工程 800 kV 超长 GIS 主回路电阻测试技术[J]. 青海电力, 2011(s1):42-44.

ZHANG Ming, ZHOU Hui'an, LIU Wenge, et al. Riyue

(下转第 54 页)

- HE Weixing, LIU Shunxin. Design and experimental analysis of rectangular bus bar contact resistance test system[J]. Electrical Manufacturing, 2012(11):71-73.
- [22] 吕启深. 不同接触电阻在负荷电流增大情况下发热的预测方法[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(3):249-253.
- LYU Qishen. Heating prediction with different contact resistance under the condition of increasing load current[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(3):249-253.
- [23] 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.
- [24] 陈仕龙, 张杰, 毕贵红, 等. 一种基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10):77-83.
- CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. A fault location method based on high frequency attenuation characteristic of UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10):77-83.
- [25] 罗兵. 基于 ANSYS 的空心并联电抗器抗震性能计算分析[J]. 变压器, 2015, 52(2):6-10.
- LUO Bing. Analysis and calculation of seismic performance for air core parallel reactor based on ANSYS[J]. Transformer, 2015, 52(2):6-10.
- [26] 朱岸明, 李润秋, 郑楠, 等. 超高压磁控式并联电抗器励磁特性分析[J]. 变压器, 2014, 51(11):29-32.
- ZHU Anming, LI Runqiu, ZHENG Nan, et al. Analysis of excitation characteristic for EHV magnetically controlled shunt reactor[J]. Transformer, 2014, 51(11):29-32.
- [27] 栾铸德, 曹克涛, 郑欢. 干式空心电抗器直流电阻判定标准探析[J]. 变压器, 2014, 51(7):28-30.
- LUAN Zhude, CAO Ketao, ZHENG Huan. Analysis of judgement standard for DC resistance of dry-type air-core reactor[J]. Transformer, 2014, 51(7):28-30.
- [28] 王丽君, 刘卓. 特高压干式空心电抗器电场仿真及均压装置设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2):56-60.
- WANG Lijun, LIU Zhuo. Electric field simulation and potential grading device design of UHV dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2):56-60.
- 张雷(1984—), 男, 工程师, 主要从事高压直流输电系统研究和换流阀设计。

(上接第 49 页)

- mountain 750 kV substation project of 800 kV long GIS main loop resistance testing technology[J]. Qinghai Electric Power, 2011(s1):42-44.
- [11] 李楠, 郭云峰. 回路电阻测试仪的使用与维护[J]. 仪器仪表用户, 2013(6):99-100.
- LI Nan, GUO Yunfeng. Use and maintenance of circuit resistance tester[J]. Instrumentation Customer, 2013(6):99-100.
- [12] 牛文静. 断路器导电回路电阻智能测试的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- NIU Wenjing. Study on conductive loop resistance test of the intelligent circuit breaker[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [13] 肖建涛. 新型断路器回路电阻测试方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- XIAO Jiantao. Study on a new type of circuit breaker loop resistance test method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [14] 夏小飞. 基于冲击大电流测量断路器回路电阻的方法研究[J]. 电气技术, 2013(10):28-33.
- XIA Xiaofei. Study on the method of impact current measuring circuit breaker based on electric resistance[J]. Electrical Engineering, 2013(10):28-33.
- [15] 周沛洪, 戴敏, 娄颖, 等. 1 000 kV 交流断路器开断电流的直流分量时间常数和零偏现象[J]. 高电压技术, 2009, 35(4):722-730.
- ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying, et al. The DC component of the time constant of 1 000 kV AC circuit breaker current and zero offset phenomena[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4):722-730.
- [16] 张华. 高压断路器回路电阻超标原因分析及处理[J]. 湖南电力, 2012(5):49-50.
- ZHANG Hua. Cause analysis and treatment of exceed the standard of high voltage circuit breakers[J]. Hunan Electric Power, 2012(5):49-50.
- [17] 袁小娟, 苗本建. 高压隔离开关主回路电阻测量结果不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2010(2):69-70.
- YUAN Xiaoxian, MIAO Benjian. The main loop resistance evaluation of uncertainty in measurement of high voltage isolation switch[J]. Metrology & Measurement Technique, 2010(2):69-70.
- 李洋(1987—), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向高压技术, 主要从事变电检修工作。