

DOI: 10.7667/PSPC201784

特高压变电站工频电磁场对避雷器在线监测装置 测量准确度影响研究

张露¹, 王永勤¹, 贺家慧¹, 吴彤¹, 罗浪², 李佳², 张兴无²

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430071;

2. 国网湖北省电力有限公司检修公司, 湖北 武汉 430050)

摘要: 变电站现场存在各种干扰, 可能影响避雷器泄漏电流的测量准确度。在实验室内对避雷器在线监测装置开展试验, 施加工频电场/工频磁场干扰并检验测量准确度。在工频电场干扰时, 若传感器电流线未采用屏蔽, 泄漏电流测量读数会出现较明显的波动。传感器电流线采用屏蔽能够有效抵制工频电场干扰布线方式的改变, 也会明显改变避雷器泄漏电流的测量结果。在工频磁场增大的情况下, 避雷器泄漏电流的波动范围也会增大。

关键词: 工频电磁场干扰; 避雷器; 泄漏电流; 在线监测装置; 测量准确度

Accuracy examination of linkage current online measurement of surge arresters under power frequency interference of electric field and magnetic field in the ultra-high voltage substations

ZHANG Lu¹, WANG Yongqin¹, HE Jiahui¹, WU Tong¹, LUO Lang², LI Jia², ZHANG Xingwu²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Corporation Ltd, Wuhan 430071, China;

2. Maintenance Company of State Grid Hubei Electric Power Corporation Ltd, Wuhan 430050, China)

Abstract: Various kinds of interference in the ultra-high voltage substations are significantly inferential to the linkage current measurement of surge arresters. In order to check the normal measurement of the linkage online current measurement of surge arresters, both electric field and magnetic field interference at power frequency is proposed in the lab tests. Under the electric field interference, the test results of linkage current are over the error of the nominal value on the plate of the device if the wires of the sensor are not shielded. However, using the shielding can avoid this electric field interference. Moreover, placement of the wires can obviously change the measurement results. Meanwhile, the level of change of the measurement data increases with the electric field interference.

Key words: electromagnetic interference at power frequency; surge arrester; leakage current; online measuring device; measurement accuracy

0 引言

带电检测和在线监测是获取设备运行数据的重要手段, 检测装置的有效性及其可靠性是状态检修的重点内容之一。国网十三五运检规划明确提出, 提升检测装置可靠性和测量技术实用性是智能运检的发展重点之一。明确基础数据的收集完整真实, 才能获取设备实际的运行状态, 提升状态检修应用水平^[1-3]。避雷器在线监测装置广泛安装于 220 kV 及以上电压等级的变电站中^[4-6]。根据国家电网公司 2013 年《变电设备在线监测装置提升方案》统计,

避雷器绝缘在线监测装置 220 kV 及以上电压等级设备装用比率约为 58%, 占各类在线监测装置总量的 30%。其中避雷器在线监测设备误报率较高, 主要原因为设备持续在复杂电磁环境下运行, 易出现通信故障, 由于设备抗干扰能力差和传感器测量误差大导致数据异常引起告警^[7-10]。

运行中的特高压变电站现场存在各类干扰(如工频电场、工频磁场、无线电骚扰和可听噪声等), 其中工频电场和工频磁场是两个重要的干扰源。由于氧化锌避雷器泄漏阻性电流值为微安或毫安级别, 因此极易受现场干扰影响。特高压变电站现场

受相间分布电容、表面污秽泄漏电流的影响导致变电站现场的阻性测量数据波动较大。因此,本文结合湖北某变电站改造工程,在实验室内搭建工频电磁场环境,考核变电站内预安装的避雷器在线监测装置在工频电磁环境下的测量能力。

1 试验方法

本节先介绍如何在实验室内搭建工频电磁场环境。

1.1 试验设备

由文献[10-11],110~500 kV 变电站多数测点电场小于 4 kV/m,最大电场强度一般小于 15 kV/m,站内工频磁场感应强度小于 20 μ T。本次试验标准电场发生装置和磁场发生装置的输出比测量值大一个数量级,以模拟较恶劣的工况。

试验设备的标准电场发生装置、标准磁场发生装置和标准源等组成。其中,电场发生装置由调压装置、升压变压器和两块 1 m \times 1 m 的极板构成,极板间距 0.6 m。电场发生装置示意图如图 1 所示,连接极板外标准源的实测试品置于极板间。

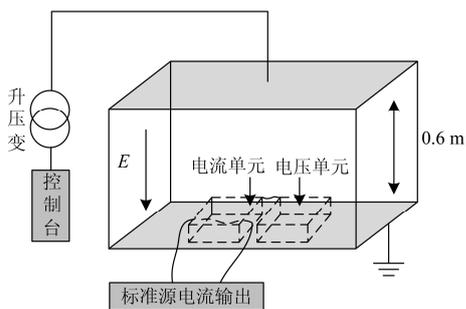


图 1 电场发生装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the electric field generator

磁场发生装置包括调压台、升流器、Fluke 电流钳表和磁强计。磁场发生装置示意图如图 2 所示,磁场计和连接极板外标准源的实测试品置于线圈内。被试设备为避雷器在线监测装置电流单元和电压单元(本文使用的是某公司生产的 ZXBLQ-氧化锌避雷器在线监测系统)。其中电流监测单元铭牌准确度均为 $\pm(5\%$ 读数 $+0.005)$ mA。

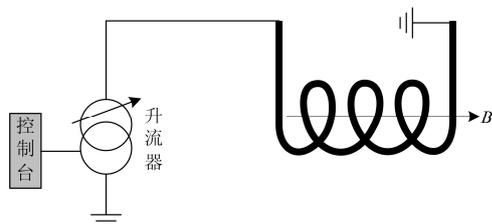


图 2 磁场发生装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the magnetic field generator

1.2 试验测量参数

根据相关规程^[12-13],对在线监测装置的实验室检验包括全电流、阻性电流和容性电流等。阻性电流的检验值应该包括测量点 100 μ A、500 μ A、1 mA。另外,参照国网公司关于《避雷器泄漏电流检测仪检验比对能力评价工作方案》,试验还应增加 50 μ A(最大允许误差 $\pm 20\%$)。

记录在线监测装置 10 个数据,计算最大值、最小值和平均值。同时,结合现场实际情况(特高压变电站全电流值约为 2 mA),本文设定阻性电流最大检测 2 mA,全电流最大检测到 10 mA。

本文在 $I_{r1p}=50 \mu$ A 点开展工频电场/磁场干扰试验。按 $I_{rp3}/I_{rp1}=3:1$,三次谐波电流峰值 $I_{rp3}=20 \mu$ A。容性电流峰值 $I_{cp}=5$ mA,或 $I_{cp}=1$ mA。

由于避雷器在线监测装置准确度为 $\pm(5\%$ 读数 $+0.005)$ mA,计算得在 50 μ A 点最大允许误差约为 ± 0.0075 mA。

1.3 试验条件

1.3.1 无干扰

不加工频电场和工频磁场,通过实验室标准源(MOVJ-2)输出标准电压电流,对避雷器在线监测系统电流监测单元和电压监测单元开展阻性电流、全电流和参比电压检验^[14-17]。

1.3.2 施加工频电场干扰

将标准电压电流源置于电场外,将在线监测装置放入极板中间,通过调压器和升压变压器产生 10~50 kV 的电压,加到间隔 0.6 m 的极板上端。极板下端、避雷器监测单元外壳、升压变压器外壳需良好接地。标准电压电流源的电流线分为屏蔽线和普通单芯线,穿过在线监测装置的传感器形成闭合回路。工频电场干扰试验的接线示意图见图 3。

试验在 50 μ A 点下进行,分三种工况进行测试,分别为:采用屏蔽线施加标准电流;采用普通单芯线施加标准电流;改变电流线位置施加标准电流。



图 3 施加工频电场的试验接线图

Fig. 3 Lab test for power frequency electric field interference

1.3.3 施加工频磁场干扰

将标准电压电流源置于磁场外，通过调压器和升流变压器产生电流，Fluke 钳表监视升压器输出电流，在线监测单元外壳接地。将在线监测装置放入磁场下，通过磁强计测量靠近传感器外侧的磁场强度如图 4 所示。

标准源设置基波电流峰值 $I_{rp}=50 \mu\text{A}$ ，容性电流峰值 $I_{cp}=5 \text{mA}$ ，按 $I_{rp3}/I_{rp1}=3:1$ 设置 $I_{rp3}=20 \mu\text{A}$ 。介损角 $\delta=89.4271^\circ$ 。

分两种工况进行测试，分别为：采用屏蔽线施加标准电流；采用普通单芯线施加标准电流。

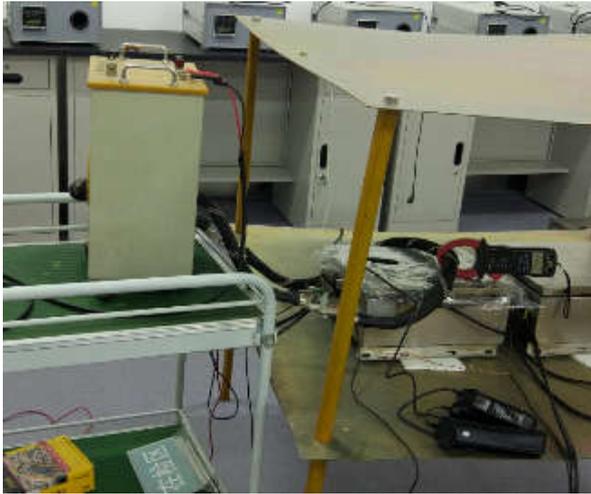


图 4 施加磁场干扰测量接线图

Fig. 4 Lab test of magnetic interference

2 试验结果

在实验室工频电磁场环境下开展避雷器在线监测装置在工频电磁环境下测量能力的检验。

2.1 无干扰

不施加工频电场和工频磁场，测量结果见表 1。根据表 1 结果，满足铭牌准确度要求。

表 1 电流、电压单元测量结果(无干扰)

Table 1 Measured current and voltage data without interference

阻性电流基波峰值		全电流有效值		参比电压	
标准值/ mA	示值/ mA	标准值/ mA	示值/ mA	标准值/ mA	示值/ mA
0.05	0.055 991 9	1	1.001 19	20	20.0085
0.1	0.106 616	2	2.000 84	40	40.0023
0.5	0.507 136	5	5.012 26	60	59.9357
1	1.007 33	8	8.022 49	80	79.791
2	2.008 58	10	10.0179	100	99.4538

2.2 施加工频电场干扰

2.2.1 采用屏蔽线施加阻性电流

由标准源输出 $50 \mu\text{A}$ 标准阻性电流。设置

$I_{rp}=0.05 \text{mA}$ ， $I_{cp}=5 \text{mA}$ ，介损角 $\delta=89.4271^\circ$ 。

电流回路采用屏蔽线，读取 10 次试验值，试验结果见表 2。

表 2 不同场强下阻性电流基波峰值准确度的测量结果

Table 2 Measured fundamental peak of the resistive current under various electric field

试验条件	10 kV/0.6 m	20 kV/0.6 m	30 kV/0.6 m
计算值 E/(kV/m)	17	33	50
测量最大值/mA	0.056 415	0.057 325	0.056 528
测量最小值/mA	0.054 463	0.053 747	0.054 908
10 次平均值/mA	0.055 175	0.055 339	0.055 646
试验条件	40 kV/0.6 m	50 kV/0.6 m	—
计算值 E/(kV/m)	67	83	—
测量最大值/mA	0.058 917	0.056 415	—
测量最小值/mA	0.054 017	0.054 463	—
10 次平均值/mA	0.055594	0.055 175	—

由测量结果可知，采用屏蔽线可以有效去除电场干扰。试验过程中避雷器在线监测装置的测量数据稳定，且符合铭牌参数标称 $\pm(5\% \text{读数} + 0.005) \text{mA}$ 的准确度要求。

2.2.2 采用普通单芯线施加标准电流

由标准源输出 $50 \mu\text{A}$ 标准阻性电流。设置 $I_{rp}=0.05 \text{mA}$ ， $I_{cp}=1 \text{mA}$ ，介损角 $\delta=87.1376^\circ$ 。

电流回路采用普通单芯线，读取 10 次试验值，试验结果见表 3。

表 3 不同场强下阻性基波电流峰值准确度测量

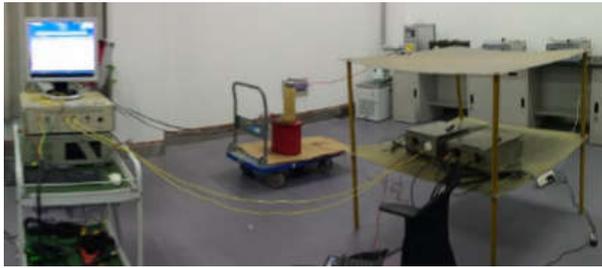
Table 3 Measured fundamental peak of the resistive current under various electric field

试验条件	10 kV/0.6 m	20 kV/0.6 m	30 kV/0.6 m
计算值 E/(kV/m)	17	33	50
测量最大值/ μA	0.059 698 4	0.054 494 6	0.063 629
测量最小值/ μA	0.054 364 5	0.050 767 9	0.049 347
10 次平均值/ μA	0.058 021 38	0.052 472 6	0.055 954
试验条件	40 kV/0.6 m	50 kV/0.6 m	—
计算值 E/(kV/m)	67	83	—
测量最大值/ μA	0.066 78	0.068 506	—
测量最小值/ μA	0.045 483	0.041 773	—
10 次平均值/ μA	0.052 382	0.060 453	—

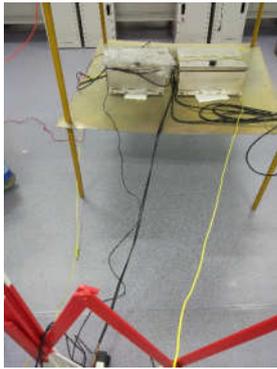
由表 3 结果可知，普通单芯线在电场下易受干扰，导致施加的标准电流也受到干扰；测量结果的偏差范围和平均值都随着场强增大而明显增大。考虑变电站现场情况，在线监测装置的进线和出线端均为裸线，这是导致避雷器在线监测设备阻性电流测量结果偏差的一个因素。

2.2.3 采用普通单芯线并改变布线方式

由标准源输出 $50\ \mu\text{A}$ 标准电流, 设置 $I_{\text{rp}}=0.05\ \text{mA}$, $I_{\text{cp}}=5\ \text{mA}$, 介损角 $\delta=89.4271^\circ$ 。电流回路采用普通单芯线。随意改变普通单芯线的布线方式如图 5, 在 $50\ \text{kV}/0.6\ \text{m}$ 的条件下开展测量, 读取 10 次试验值, 结果见表 4。



(a) 本文测量布线方式



(b) 改变布线方式 1



(c) 改变布线方式 2

图 5 三种布线方式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of three wiring modes

表 4 三种布线方式的测量结果

Table 4 Measured data of three wiring modes

50/0.6/(kV/m)	本文测量	改变布线	改变布线
	布线方式	方式 1	方式 2
测量最大值/mA	0.068 506	0.093 185 5	0.084 279 6
测量最小值/mA	0.041 773	0.022 413 3	0.031 320 8
10 次平均值/mA	0.060 453	0.057 138	0.056 736 4

由表 4 结果可知, 标准电流输出不采用屏蔽线时, 布线方式变化对测量结果有较为明显的影响。布线方式的改变, 对测量极大/小值、平均值都有明显影响。分析原因, 可能是由于不同接线方式下分布电容不同, 导致标准电流出现波动, 在线监测装置测量结果也随之变动。

变电站现场避雷器接地引下线为裸露扁铁, 泄漏电流受空间电场分布干扰可能会导致避雷器在线监测装置读数有较多波动。

2.3 工频磁场干扰试验

2.3.1 采用屏蔽线施加标准电流

1) $\delta=89.4271^\circ$ 时磁场试验

由标准源输出 $50\ \mu\text{A}$ 标准阻性电流。设置 $I_{\text{rp}}=0.05\ \text{mA}$, $I_{\text{cp}}=5\ \text{mA}$, 介损角 $\delta=89.4271^\circ$ 。

电流回路采用屏蔽线施加磁场干扰。读取 10 次试验值, 在线监测装置读数见表 5。

表 5 采用屏蔽线施加标准电流情况下的测量结果

Table 5 Measured data of using shielding wire and the standard current

施加标准电流/A	152	222	395	559
磁强计测量/mT	0~0.5	0.5~1	1.5~2	2~3
测量最大值/mA	0.057 054	0.058 348	0.063 313	0.064 885
测量最小值/mA	0.053 882	0.048 943	0.047 384	0.042 724
10 次平均值/mA	0.055 988	0.054 732	0.056 824	0.054 319

2) $\delta=87.1376^\circ$ 时磁场试验

由标准源输出 $50\ \mu\text{A}$ 标准阻性电流。设置 $I_{\text{rp}}=0.05\ \text{mA}$, $I_{\text{cp}}=1\ \text{mA}$, 三次谐波电流峰值 $I_{\text{rp3}}=0.02\ \text{mA}$, 介损角 $\delta=87.1376^\circ$,

电流回路采用屏蔽线施加磁场干扰。读取 10 次试验值, 测量结果见表 6。

表 6 采用屏蔽线施加标准电流情况下的测量结果

Table 6 Measured data of using shielding wire and the standard current

施加标准电流/A	152	222	395	559
磁强计读数/mT	0~0.5	0.5~1	1.5~2	2~3
测量最大值/mA	0.054 527	0.054 122	0.055 98	0.057 807
测量最小值/mA	0.050 554	0.049 843	0.048 681	0.046 831
10 次平均值/mA	0.052 196	0.052 23	0.051 414	0.052 074

2.3.2 采用普通单芯线施加标准电流

1) $\delta=89.4271^\circ$ 时磁场试验

由标准源输出 $50\ \mu\text{A}$ 标准阻性电流。设置 $I_{\text{rp}}=0.05\ \text{mA}$, $I_{\text{cp}}=5\ \text{mA}$, 介损角 $\delta=89.4271^\circ$ 。

电流回路采用普通线, 读取 10 次试验值, 测量结果见表 7。

表 7 采用普通线施加电流情况下的测量结果

Table 7 Measured data of using non-shielding wire and the standard current

施加标准电流/A	151	220	394	556
磁强计读数/mT	0~0.5	0.5~1	1.5~2	2~3
测量最大值/mA	0.057 244	0.058 765	0.061 039	0.064 728
测量最小值/mA	0.051 556	0.051 725	0.047 954	0.055 77
10 次平均值/mA	0.053 958	0.055 39	0.054 433	0.061 635

由表 7 测量结果可以看出, 在角度为 89° 的较严格的方式下, $0.5\ \text{mT}$ 及以上会造成测量值的波动

超过其允许范围。

2) $\delta=87.1376^\circ$ 时磁场试验

由标准源输出 50 μ A 标准阻性电流。设置 $I_{rp}=0.05$ mA, $I_{cp}=5$ mA, 介损角 $\delta=87.1376^\circ$ 。

电流回路采用普通线且电流回路交叉, 读取 10 次试验值, 测量结果见表 8。

表 8 采用普通线施加标准电流情况下的测量结果

Table 8 Measured data of using non-shielding wire and the standard current

施加标准电流/A	152	222	395	559
施加磁场干扰/mT	0-0.5	0.5-1	1.5-2	2-3
测量最大值/mA	0.054 056	0.054 896	0.056 482	0.057 723
测量最小值/mA	0.050 331	0.049 578	0.047 736	0.045 992
10 次平均值/mA	0.052 33	0.051 361	0.052 616	0.048 552

由表 8 测量结果可以得出, 在角度为 87° 的方式下, 磁场为 2 mT 的测量结果也能满足其准确度要求。

3 结论

在变电站现场干扰影响避雷器泄漏电流测量的背景下, 本文在实验室内对避雷器在线监测装置施加工频电场和工频磁场干扰以校验避雷器在线监测装置测量准确度, 所得结论如下:

1) 在工频电场干扰下, 若传感器电流线未采用屏蔽, 泄漏电流读数可能超出铭牌标称误差, 而传感器电流线采用屏蔽能够有效抵制工频电场干扰。

2) 低至 0.5 mT 的工频磁场可能造成测量值的波动超限。另外, 布线方式的改变也会明显改变避雷器泄漏电流的测量结果。

3) 在工频磁场增大的情况下, 避雷器泄漏电流的波动范围也会随之增大。

本文初步验证了变电站电磁场对避雷器泄漏电流测量存在的不利影响, 为下一步开展仪器检测和抗干扰设计提供依据和参考。

参考文献

[1] 彭少博, 郑永康, 周波, 等. 220 kV 智能变电站检修二次安措优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 143-148.
 PENG Shaobo, ZHENG Yongkang, ZHOU Bo, et al. Study of optimization of secondary safety measures of 220 kV smart substation maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 143-148.

[2] 霍明雷, 刘艳, 杨林. 计及风险损失的配电设备检修方式选择[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19):

100-106.
 HUO Minglei, LIU Yan, YANG Lin. Maintenance mode selection of power distribution equipment considering the loss of risk[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 100-106.

[3] 唐燕, 刘艳. 考虑电网总风险和检修收益的设备状态检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 33-39.
 TANG Yan, LIU Yan. Optimization for maintenance schedule based on equipment condition considering the overall risk of grid operation and the maintenance revenue[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 33-39.

[4] 崔涛, 曾宏, 刘吕娜, 等. 串补电容器用避雷器在线监测装置的设计[J]. 电瓷避雷器, 2013(4): 64-67, 74.
 CUI Tao, ZENG Hong, LIU Lina, et al. Research of MOV online monitoring device used in series compensation capacitor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(4): 64-67, 74.

[5] 赵冬一, 胡淑慧, 王兰义, 等. 智能变电站用金属氧化物避雷器在线监测技术的研究发展[J]. 电瓷避雷器, 2013(5): 66-72.
 ZHAO Dongyi, HU Shuhui, WANG Lanyi, et al. Research and development of on-line monitoring technology of metal oxide surge arresters for smart substation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(5): 66-72.

[6] 周妮娜, 祝祥林. 避雷器在线监测系统的设计[J]. 电瓷避雷器, 2013(1): 112-116.
 ZHOU Nina, ZHU Xianglin. Design of on-line monitoring system for metal-oxide arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(1): 112-116.

[7] 莫旭阳. 氧化锌避雷器状态在线监测系统设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
 MO Xuyang. Design of MOA online monitoring system[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014.

[8] 王金海. 金属氧化锌避雷器在线监测原理及系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
 WANG Jinhai. Research on metal oxide surge arrester on-line monitoring principle and system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

[9] 吴朦朦. 氧化锌避雷器在线监测及专家诊断系统[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
 WU Mengmeng. MOA on-line monitoring and expert diagnosis system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

- [10] 王振宁. 避雷器在线监测系统在内蒙古电网运行分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WANG Zhenning. Analysis of lightning arrester online monitoring system in Inner Mongolia power grid operation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [11] 邬雄, 万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [12] 中国电力企业标准联合会. 氧化锌避雷器阻性电流测试仪通用技术条件: DL/T 987—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
China Electricity Council. General technical conditions of resistive current tester for zine surge arrester: DL/T 987—2005[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [13] 中国电力企业标准联合会. 避雷器监测装置校准规范: DL/T 1561—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
China Electricity Council. Codes for calibrating the monitoring devices for the lightning arresters: DL/T 1561—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [14] 刘柱揆, 曹敏, 董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.
- [15] 蒋愈勇, 习伟, 刘立斌, 等. 基于 IEC61850 的电子式互感器在线监测与校验系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 117-122.
JIANG Yuyong, XI Wei, LIU Libin, et al. Design of online monitoring and calibration system for electronic transformer based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 117-122.
- [16] 王晶, 曹文斌, 杨增力, 等. 多种电流互感器暂态饱和特性及其复杂工况下动模试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 58-65.
WANG Jing, CAO Wenbin, YANG Zengli, et al. Study on multiple types of CTs transient saturation and its dynamic simulation tests in complex operating conditions[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 58-65.
- [17] 王治国, 陆静, 笃峻, 等. 一种智能电网保护装置远程诊断系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 86-91.
WANG Zhiguo, LU Jing, DU Jun, et al. Research on remote diagnosis system of smart grid protection device[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 86-91.

收稿日期: 2017-07-31

作者简介:

张露(1986—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。E-mail: octopus027@163.com

(编辑 葛艳娜)