

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.012

110 kV AIS 隔离开关分合操作瞬态电场的模拟实验研究

褚磊^{1,2}, 饶旭妮³, 成林², 郭洁³, 吴经锋², 张诚³, 高子豪³

(1. 国网陕西省电力公司渭南供电公司, 陕西 渭南 714099; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100;

3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 在空气绝缘变电站(air insulated substations, AIS)中, 为了研究隔离开关分合空载母线产生的空间电磁环境对站内一次侧电子设备的影响, 需要在实际变电站现场进行大量重复实验以获得空间电磁环境变化规律, 但这对正常电力运维是不现实的。文中设计了可以模拟实际隔离开关操作产生的瞬态电磁场的隔离开关模拟骚扰源, 利用该源对110 kV AIS隔离开关分合操作产生的电场随母线参数、隔离开关触头距离、电源容量进行研究。研究表明: 该系统可以产生频率在0.9~2 MHz左右、强度在6~20 kV的空间瞬态电场, 与现有文献报道的110 kV AIS站隔离开关操作实测瞬态电场数据相吻合。

关键词: 隔离开关; 站内一次侧电子设备; 瞬态电场; AIS; 隔离开关模拟骚扰源

Simulated Experimental Study on Transient Electric Field of 110 kV AIS Disconnecter During Opening and Closing Operation

CHU Lei^{1,2}, RAO Xuni³, CHENG Lin², GUO Jie³, WU Jingfeng², ZHANG Cheng³, GAO Zihao³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Weinan Power Supply Company, Shaanxi Weinan 714099, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Province Electric Power Company, Xi'an 710100, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In air insulated substations (AIS), in order to study the influence of the space electromagnetic environment generated by the disconnector operated on the no-load bus to the electronic transformer, a large number of repeated tests are required to obtain the spatial electromagnetic environment change rule. However, a large number of repeated tests in substations are forbidden. Therefore, this paper designs a simulated disturbance source system that can simulate the actual disconnector operation. The system can be used to study the law of the electric field generated by 110 kV AIS disconnector's operation with different parameters. The experimental results show that the system can generate spatial transient electric field with frequency of 0.9 MHz to 2 MHz and intensity of 6 kV to 20 kV, which is in good agreement with the measured electric field data of the 110 kV AIS station reported in the existing literature.

Key words: disconnector; primary side electronic equipment in station; transient electric field; AIS; disconnector simulated disturbance source

0 引言

随着中国电网的快速发展, 电压等级不断提升、电网容量不断增大, 变电站中由于开关操作等引起的电磁干扰越来越强, 这对站内电子设备, 如电子式互感器、智能终端、在线监测及就地化装置

等设备的电磁兼容性提出了更高的要求。变电站操作产生的电磁干扰以隔离开关分合空载母线最为严重, 常常产生复杂的强电磁骚扰环境, 影响站内电子式设备的正常工作^[1-15], 导致电网保护误动作等事故, 严重影响电网的安全运行。

据统计, 在中国110 kV及以上电压等级电网系

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-11-05

基金项目: 陕西省重点研发计划(2017年度)(2017GY-031)。

Project Supported by Key Research Development Programs in Shaanxi(2017)(2017GY-031).

统中遭受电磁干扰而发生设备的故障中,电子式互感器的故障率最高^[9]。为了研究AIS变电站内的隔离开关操作产生的瞬态电磁环境对电子互感器的影响,需要在实际变电站内做大量重复实验以获得统计性规律,而这对正常电力运行是不允许的,因此需要研究建立模拟实际变电站电磁环境的实验系统,并基于此实验系统,深入研究变电站结构、设备参数对瞬态电磁环境的影响。

基于现有变电站实测结果,研制了110 kV AIS隔离开关模拟骚扰源,该模拟骚扰源具有与实际隔离开关产生的电磁环境等效的优点;并基于此隔离开关模拟骚扰源对变电站内瞬态电场特性展开研究,研究了110 kV AIS隔离开关操作产生的电场随母线参数、隔离开关触头距离、电源容量变化的规律,为提出基于隔离开关模拟骚扰源的电子式互感器电磁兼容性能实验方法奠定基础。

1 隔离开关模拟骚扰源实验系统

在AIS隔离开关分、合操作时,会引起电力运行状态的改变,电力系统会从一种稳定状态振荡过渡至新的稳定状态,振荡过程的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (1)$$

式(1)中, R 、 L 、 C 分别为隔离开关分、合操作过程回路中的等效总电阻、总电感和总电容。

在振荡过程中,若回路参数 L 和 C 的数值较小,则会产生频率很高的瞬态过电压。在高频过电压的作用下,隔离开关触头间将产生电弧重燃,在回路中形成一系列的高频振荡,高频振荡电压和电流会通过传导、电场、磁场、辐射等耦合方式骚扰电网的二次系统,造成二次系统的各种故障。由式(1)可见,隔离开关操作产生的电磁振荡主频率与回路的等效电气参数有关。

根据麦克斯韦方程组,振荡过程中空间电场和磁场满足以下表达式。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \rho \quad (5)$$

式(2)~(5)中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; ρ 为空间电荷。可看出,电场分为2部分,一部分是由电荷引起的库伦电场,另一部分是由磁场变化引起的感应电场。在工频稳态中,空间中的电场主要由

电荷引起的库伦电场。而当隔离开关操作时,除了库伦电场外,回路中的高频电流引起了空间磁场的快速变化,从而引起的感应电场,感应电场具有衰减快,频率高的特点。因此,由库伦电场和感应电场叠加而成的瞬态电场会在隔离开关操作时产生很高的幅值,对二次设备造成损害。

在隔离开关操作过程中,影响系统电磁瞬态过程的因素主要有母线等效电容、电源容量、隔离开关操作速度等,而由式(2)~(5)可以看出,系统中的电磁瞬态过程会影响到瞬态电场的强度与频率。由于每个变电站不同结构,因此会造成隔离开关操作产生的瞬态电场的频率和强度的不同,为了建立可以模拟实际大多数110 kV AIS隔离开关分合操作瞬态电场的模拟骚扰源实验系统,文中在先前的研究基础上获得的110 kV变电站测得的隔离开关操作产生的电场数据^[16-24],瞬态电场强度范围在0~20 kV,频率范围在0~50 MHz,主频在1 MHz左右,也有少数峰值出现在10 MHz左右。以这些实测电场数据为依据研究搭建了隔离开关模拟骚扰源实验系统。通过调整隔离开关模拟骚扰源的设备参数,可以模拟不同长度、直径母线、电源容量、隔离开关合分闸不同距离下的电弧长度等造成的瞬态电场变化,产生的瞬态电场变化范围与先前的研究报道的电场特性相一致。

隔离开关模拟骚扰源主要由电弧发生器(球隙)、断路器、负载侧电容、电源侧电容、测量系统等组成,建立的模拟骚扰源实验系统见图1。系统等效电路模型见图2。



图1 实验系统实际结构

Fig. 1 Actual layout of test system

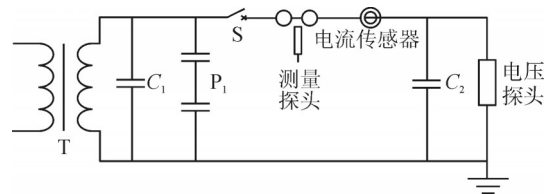


图2 实验系统等效电路

Fig. 2 Circuit model of test system

图2中:T为无局放高压试验变压器,用于模拟实际变电站现场中的工频高压电源; P_1 为高压电源

电容分压器,用于在控制台监测电源电压; C_1 为电源侧电容器,用于模拟电源容量的改变; S 为真空断路器,用于控制模拟骚扰源的通断;放电球隙用于模拟实际AIS隔离开关的通断电弧过程,由于隔离开燃弧时的触头距离的不同,造成的电磁骚扰也不同,为了定量找出隔离开关触头燃弧距离与瞬态电场的关系,放电球隙间距在图1操作过程中保持不变; C_2 为负载侧电容器,用于模拟空载母线等效电容值的变化。

2 瞬态电场特性的实验研究

2.1 研究内容

基于隔离开关模拟骚扰源实验系统,对母线参数、隔离开关触头距离、电源容量对空间电场环境的影响展开研究,在隔离开关模拟骚扰源系统中,不同长度、直径的母线可用改变负载电容值实现,隔离开关燃弧的触头距离用球隙距离实现,而电源容量的改变可通过电源电容值的改变实现,断路器分合闸时间主要反映电磁骚扰持续时间,在文中设置燃弧时间为常量150 ms,变压器电压设置为110 kV变电站额定电压值。在实验中采用固定变量法,研究电源容量、母线电容、燃弧的触头距离对电场的影响及电场的空间分布。设置实验初始状态为电源电容2 000 pF,球隙距离2 cm,负载电容2 000 pF,断路器分合闸时间150 ms,每次仅改变一个实验变量,观察空间电场强度的变化。

为了测量电场的空间分布,以球隙装置左侧地面点为坐标原点 $O(0,0,0)$,球杆方向为 X 轴,建立右手直角坐标系,见图3。将测量探头放在以下3个位置,测量点位置坐标分别为 $A(0.27,-1,1)$, $B(2.02,1.31,1)$, $C(0.77,-1,1)$ (坐标单位:m)。其中, B 点距离实验回路最近。

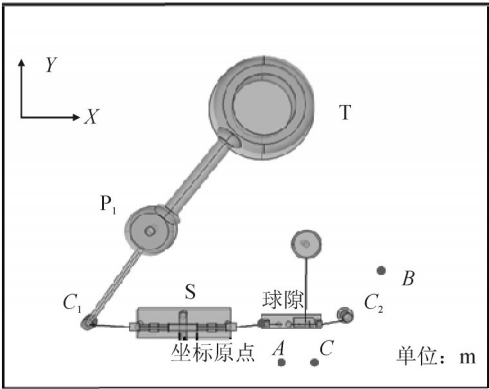


图3 测量点位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the position of measuring point

2.2 电场的空间分布

隔离开关分合操作产生的瞬态空间电场分布

极不均匀,是空间位置的函数。在隔离开关触头击穿时距离击穿点不同位置处瞬态电场强度不同,测量了空间中隔离开关不同距离的 A 、 B 、 C 三个点在电容电源值1 000 pF,其余参量为初始状态的瞬态电场幅值,见表1。

表1 空间电场测量数据

Table 1 Spatial electric field measurement data $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$				
测量点	E_x	E_y	E_z	E
A	4.76	2.77	3.68	6.62
B	7.59	3.17	3.26	8.85
C	4.06	3.74	4.82	7.33

由表1可见,隔离开关产生的瞬态电场在空间上的分布是不均匀的。空间中某一点的瞬态电场强度与到平行的负载导线距离有关。距离负载导线越近,瞬态电场强度越大。瞬态电场强度在 X 、 Y 、 Z 这3个方向上的数值受到周围电流路径的影响,与电流方向平行方向的电场强度幅值较大。

2.3 隔离开关分合闸对应的触头击穿距离影响

燃弧时隔离开关两触头间的距离影响了电弧的长度,而电弧长度直接影响瞬态电场特性。改变隔离开关模拟骚扰源中的球隙间距可以模拟隔离开关触头间形成的电弧长度变化。每次实验改变球隙间距以模拟隔离开关运动过程中某一时刻的击穿位置及电弧长度。空间中 A 点瞬态电场幅值随球隙间距变化曲线见图4。

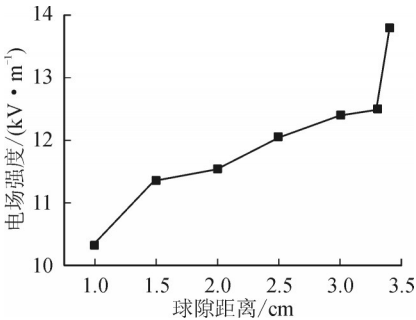
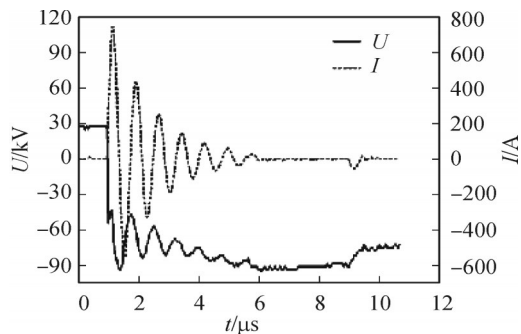


图4 瞬态电场幅值随球隙距离变化曲线

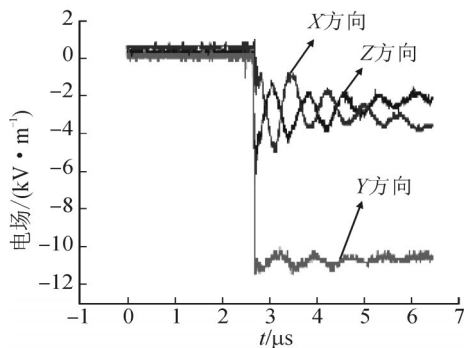
Fig. 4 Change curve of E with gap distance

由图4可以看出,随着球隙距离的增加, A 点的瞬态电场强度也在增加,当球隙为1 cm时瞬态电场强度为10.34 kV/m,球隙间距为3.4 cm时瞬态电场强度达到了13.80 kV/m,而对应该点在正常运行时,工频电场仅为8.00 kV/m,瞬态电场最大为工频电场的1.73倍。球隙间距为3.4 cm击穿时刻3个方向的瞬态电场及电压电流波形图见图5。从图5中可看出,在击穿过程中,电流出现了阻尼衰减振荡,击穿瞬间回路高频电流最大可达到689 A,同时负载侧电压也发生了振荡。瞬态电场3个方向中,以 X 方

向振幅最大,即与电流平行方向电场强度最大。在球隙击穿的电磁瞬态过程中,振荡频率在1.3 MHz左右,且并不随着球隙距离的增加而改变,球隙为3.4 cm时击穿时刻回路电流和A点电场X方向波形的频谱图见图6。



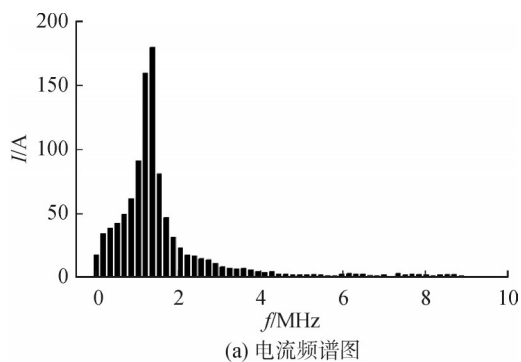
(a) 球隙击穿时刻负载电压电流波形



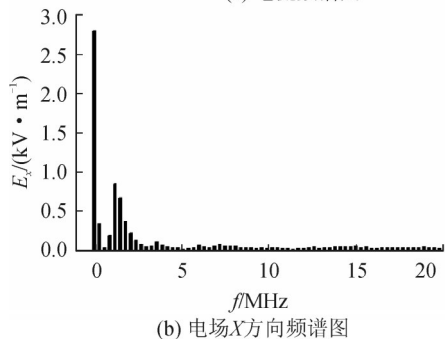
(b) 球隙击穿时刻A点瞬态电场波形

图5 球隙间距3.4 cm时击穿时波形图

Fig. 5 Breakdown waveform in load side when the gap distance is 3.4 cm



(a) 电流频谱图



(b) 电场X方向频谱图

图6 球隙间距3.4 cm时各参量频谱图

Fig. 6 Spectrum diagram of each parameter when the gap distance is 3.4 cm

从图6中可以看到,电流和电场的频谱分布大致上是一致的,主频分量主要集中在1.39 MHz。电场强度低频幅值很大,这个分量是由于电场测量系统为一个宽频带测量系统,该低频分量为瞬态低频分量和工频电场分量叠加而成。

2.4 电源容量与母线参数的影响

由隔离开关骚扰源研究原理可知,电源容量可用电源电容进行模拟调节,而母线电容值用负载电容进行模拟调节。调整负载电容和电源容量,测量点A处电场和回路负载侧电压与电流。结果见表2。

表2 负载电容值对电磁瞬态过程影响

Table 2 Influence of load capacitance value on electromagnetic transient process

负载电容/pF	过电压倍数/p.u.	电流幅值/A	电流脉冲主频率/MHz	电场幅值/(kV·m ⁻¹)
1 000	1.16	453.29	1.53	11.38
2 000	1.16	505.73	1.39	11.53
7 000	1.17	634.24	0.98	11.78
10 000	1.34	717.96	0.94	13.44

由表2可以看出,随着负载电容值的增加,过电压、过电流和瞬态电场的幅值也在增大,并且增加趋势是非线性的,脉冲主频率有所降低。当负载电容为10 000 pF时,电磁瞬态过程中各个参量发生了突增,电场幅值最大达到13.44 kV/m。这个实验结果也与实际母线电容量增加,电磁干扰更加严重现象相吻合。

电源容量对电磁瞬态过程的影响见表3,从表3可以发现,电源电容值的增加各参量的变化趋势与负载电容值变化时类似,这是因为随着电源容量的增加,击穿瞬间的电流增加,而瞬态电场与空间磁场相关,磁场与电流变化关系相对应,因此瞬态电场幅值也是增加的。这说明电源容量越大,隔离开关操作时的瞬态电场幅值越强,而电流脉冲主频率降低。

表3 电源电容值对电磁瞬态过程影响

Table 3 Influence of power capacitance value on electromagnetic transient process

负载电容/pF	过电压倍数/p.u.	电流幅值/A	电流脉冲频率/MHz	电场幅值/(kV·m ⁻¹)
1 000	1.05	378.39	1.74	11.84
2 000	1.16	505.73	1.39	11.53
7 000	1.28	524.47	1.04	12.73
10 000	1.33	577.64	0.99	13.78

由实验数据可知,模拟骚扰源可模拟得到隔离开关操作产生的电磁干扰频率为0.9~2.0 MHz,电场强度6~20 kV/m。相关文献指出,110 kV电压等级的AIS站内隔离开关操作产生的干扰信号主频率约为1~3 MHz^[16,25]。另一方面,美国电科院的研究小组分别在115、230、500 kV的AIS站经过实验得出隔离开关操作产生的电场强度幅值为4~20 kV/m^[19]。由此表明:文中搭建的隔离开关模拟平台可以准确地模拟变电站实际情况。

3 结论

根据实验结果,可以得出以下结论:

1)隔离开关合分闸因燃弧形成的空间电场不同而不同位置的电场强度有一定差别,与该位置周围电流方向有关。与稳态工频电场不同,瞬态电场还与电流的变化有关,在与电流平行的方向上的电场强度比其他方向大。

2)触头击穿时,空间会产生较大的瞬态电场,幅值最大可为稳态工频电场的1.73倍,随着燃弧时触头距离的增加,瞬态电场强度幅值增加。

3)随着母线等效电容和电源容量的增加,模拟骚扰源产生的电磁环境趋向恶劣,母线上过电压倍数增加,回路过电流和瞬态电场幅值的幅值也在增加,而电流脉冲主频率降低。

经过理论分析,以上实验结论与实际结果相符,在重复实验过程中,相同测量点的电场强度及回路中的电流参数、母线的电压具有较好的稳定性。通过调节不同的设备参数,可以改变输出的瞬态电场变化,表明了隔离开关模拟骚扰源系统模拟真实现场瞬态电磁环境的可行性、稳定性和可靠性。

参考文献:

- [1] 王洪新,贺景亮. 电力系统电磁兼容[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004.
WANG Hongxin, HE Jingliang. Electromagnetic compatibility of powersystem[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004.
- [2] RAO M M, THOMAS M J, SINGH B P. Electromagnetic field emission from gas - to - air bushing in a GIS during switching operations[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(2): 313-320.
- [3] WIGGINS C M, THOMAS D E, NICKEL F S, et al. Transient electro-magnetic interference in substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 1869-1884.
- [4] 张卫东,陈沛龙,陈维江,等. 特高压GIS变电站VFTO对二次电缆骚扰电压的实测与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 187-196.

- ZHANG Weidong, CHEN Peilong, CHEN Weijiang, et al. Measurement and simulation of disturbance voltage generated by VFTO in UHV GIS substation on the secondary cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 187-196.
- [5] 李振华,于洁,李振兴,等. 电子式互感器电磁兼容性研究现状分析[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 220-226.
LI Zhenhua, YU Jie, LI Zhenxing, et al. Electromagnetic compatibility research situation analysis of electronic transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 220-226.
- [6] 李振华,胡蔚中,闫苏红,等. 隔离开关开合下电子式互感器传导干扰分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 233-240.
LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. Conductive interference analysis and anti-interference methods of electronic transformers in disconnector switching test[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 233-240.
- [7] 钱佳斌,王立辉,魏广进. 高压开关操作引起瞬态电磁干扰的实测分析[J]. 电工电气, 2015(10): 46-50.
QIAN Jiabin, WANG Lihui, WEI Guangjin. Actual measurement analysis of transient electromagnetic interference caused by high - Voltage switch operation[J]. Electrotechnics Electric, 2015(10): 46-50.
- [8] 刘志恒,段雄英,廖敏夫,等. 电子式电流互感器电磁抗干扰仿真与测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 994-999.
LIU Zhiheng, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Simulation and test of electromagnetic interference with electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 994-999.
- [9] 刘彬,叶国雄,童悦,等. 气体绝缘开关设备的隔离开关分合操作对电子式互感器电磁兼容特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1204-1210.
LIU Bin, YE Guoxiong, TONG Yue, et al. Influence of disconnector in gas insulated switchgear switching on/off on electromagnetic compatibility of electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1204-1210.
- [10] Communication networks and systems in substations, Part 9-2: Specific communication service mapping (SC-SM)-sampled values over ISO/IEC 8802 - 3: IEC 61850 - 9 - 2—2004[S]. 2004.
- [11] CIGRE Working Group 36. 04. Guide on EMC in power plants and substations[Z]. Paris, France: CIGRE, 1997.
- [12] Instrument transducers, Part eight: Electronic current transducers: IEC 60044-8—2002[S]. 1997.
- [13] Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 4-2: Testing and measurement techniques - electrostatic discharge immunity test: IEC 61000-4-2—2002[S]. 2002.
- [14] 嵇建飞,杨逸飞,袁宇波,等. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 998-1007.
JI Jianfei, YANG Yifei, YUAN Yubo, et al. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equip-

- ment of intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 998-1007.
- [15] 刘骁繁, 崔翔, 吴恒天, 等. 500 kV 气体绝缘变电站开关操作对智能组件电流互感器端口电磁骚扰的实测及分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1709-1718.
- LIU Xiaofan, CUI Xiang, WU Hengtian, et al. Measurement and analysis on electromagnetic disturbance of intelligent electronic device current transformer ports due to switching operations in a 500 kV gas insulated substation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1709-1718.
- [16] 李小建, 钟尧, 王任, 等. 超高压系统隔离开关操作电磁骚扰的时频特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2889-2898.
- LI Xiaojian, ZHONG Yao, WANG Ren, et al. Time-frequency domain characteristics of electromagnetic disturbance in extra high voltage system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2889-2898.
- [17] 闫格, 吴细秀, 田芸, 等. 开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 119-130.
- YAN Ge, WU Xixiu, TIAN Yun, et al. Review on research of electromagnetic transient interference cause by arc discharge due to switchgear operation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 119-130.
- [18] 成林, 周传明, 卢江平, 等. 隔离开关模拟骚扰源研制及应用[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 166-173.
- CHENG Lin, ZHOU Chuanming. Development and application of disconnector simulated disturbance source[J]. High Voltage Engineering, 2016, 52(2): 166-173.
- [19] 李长益, 魏旭, 张劲松. 上河变电所500 kV 隔离开关操作中感应过电压事故分析[J]. 电力自动化设备, 2003(4): 85-88.
- LI Changyi, WEI Xu, ZHANG Jinsong, et al. Overvoltage incident due to 500 kV isolator operation in Shanghe substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 85-88.
- [20] 赵军, 陈维江, 张建功, 等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1687-1695.
- ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1687-1695.
- [21] 孙竹森, 张禹方, 张广州, 等. 500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(一)[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 16-18.
- SUN Zhushen, ZHANG Yufang, ZHANG Guangzhou, et al. Study on EM disturbance in 500 kV substation and protection measures(1) [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 16-18.
- [22] 张卫东. 变电站开关操作瞬态电磁干扰问题的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- ZHANG Weidong. Research on switching transient electromagnetic interference in substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004.
- [23] 刘青, 王乐, 刘鹏. GIS 断路器动作产生辐射电场的测量研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 166-171.
- LIU Qing, WANG Le, LIU Peng. Measurement of radiation electric field produced by action of GIS circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 166-171.
- [24] 郭飞, 孔旭, 吴旭涛. 330 kV 超高压 GIS 开关动作 VFTO 辐射电场的测量与分析[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 119-125.
- GUO Fei, KONG Xu, WU Xutao. Measurement and analysis of the radiation electric field excited by the switching operation of 330 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 119-125.
- [25] 王立辉, 钱佳斌, 嵇建飞, 等. 变电站开关瞬态干扰建模与特性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 960-965.
- WANG Lihui, QIAN Jiabin, JI Jianfei, et al. Modeling and characteristic analysis of switching transient disturbance in substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 960-965.

褚磊(1973—),男,工学硕士,高级工程师,主要从事电网设备运维检修管理及新技术新系统的研究工作。