

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.033

氧化锌避雷器受潮与电气参数的关系

史志强¹, 邓 维², 罗日成¹, 潘俊文³, 魏绍东², 李婧娴³,
陶 莹³, 薛韵辞³

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410004; 2. 国网湖南省电力公司检修公司, 长沙 410015; 3. 国网湖北省电力有限公司随州供电公司, 湖北 随州 441300)

摘要: 为能够有效监测氧化锌避雷器在线状态, 及时发现故障, 避免重大事故发生, 对500 kV 无间隙瓷外套氧化锌避雷器在不同受潮位置下各类电气参数的变化进行了试验, 分析了全电流、阻性电流分量、阻性电流3次谐波、5次谐波、有功损耗、相位角对氧化锌避雷器受潮反应灵敏度的关系。试验结果表明: 受潮位置不同, MOA 各个电气参数的变化也不同; 全电流、相位角对MOA受潮反应灵敏度不够, 只能作为对MOA受潮进行判断的初步依据; 阻性电流分量、阻性电流3次谐波相结合可作为判别MOA受潮位置的依据; 阻性电流5次谐波与有功损耗对MOA受潮反应灵敏度高, 可作为监测MOA运行状态的重要参量。在试验室对500 kV MOA不同受潮位置下各个电气参数进行了试验研究分析, 因氧化锌避雷器实际运行时的周围环境与试验室环境差异较大, 所得结论可供读者参考。

关键词: 氧化锌避雷器; 电气参数; 受潮位置; 全电流; 阻性电流分量

Relation Between Moisture and Electrical Parameters of Zinc Oxide Arrester

SHI Zhiqiang¹, DENG Wei², LUO Richeng¹, PAN Junwen³, WEI Shaodong², LI Jingxian³,
TAO Ying³, XUE Yunci³

(1. School of Electrical and information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;
2. Hunan Electric Power Corporation Maintenance Company, Changsha 410015, China; 3. Suizhou Power supply Company of Hubei Electric Power Company, Hubei Suizhou 441300, China)

Abstract: For the purpose of monitoring the status of MOA which is in services effectively and discover the potential causes of accidents of MOA timely, which is able to prevent the accidents from being expanded. The variation in the electrical parameters of 500 kV zinc oxide arrester that is tested under different moisture positions is studied in the lab. The relationship between the full current, the resistive current component, the third harmonic of the resistive current, the fifth harmonic of the resistive current, the active power loss and the phase angle on the sensitivity of the surge arrester (zinc oxide) is analyzed. The experimental results show that the variation of the electrical parameters of MOA is different under different moisture positions; the total current, the phase angle are not sensitive to the moisture sensitivity of MOA, which can only be used as the basis for the judgment of MOA moisture; the combination of resistive current component and third harmonic current can be used as a basis for judging the location of MOA; the fifth harmonic of resistive current and the active power loss have a high sensitivity to MOA, which can be used as an important parameter to monitor the running state of MOA. In this paper, the electrical parameters of 500 kV MOA under different moisture positions are tested and analyzed in the laboratory. Because of the difference between the ambient environment and the laboratory environment of the actual operation of zinc oxide arrester, the conclusions obtained in this paper are for reference only.

Key words: zinc oxide arrester; electrical parameters; moisture position; full current; resistive current component

0 引言

交流无间隙金属氧化物避雷器(MOA)自进入中国电力系统以来,因其良好的非线性电阻特性、良好的通流能力以及持久的抗老化能力而被广泛使用,尤其在超、特高压系统中有着无可替代的作用^[1-5]。由于MOA无串联间隙并长期工作在户外,受到运行电压、大气环境以及冲击过电压等的电热应力的综合作用^[6-8],电阻片及密封元件会随运行时间的增加而逐渐劣化,使其流过MOA电阻片的泄漏电流增大,泄漏电流中的阻性分量会导致电阻片温度上升,产生的有功损耗增大,严重时甚至将导致MOA爆炸,进而引发大面积的停电事故^[9]。因此,通过带电检测手段来判断MOA在线运行状态对电力系统的安全稳定运行是非常有必要的。

文[1]以1 000 kV MOA运行工况为例搭建MOA比例模型进行试验,分析了泄露电流及各电流分量对MOA受潮程度反应灵敏度的关系;文[2]阐述了MOA的各类电气基本参数,并讨论分析了如何根据各类电气参数对MOA的电气性能做出判断;文[3]通过对一起带电检测技术在避雷器状态诊断中的成功案例的介绍,说明了红外检测技术与泄漏电流阻性分量检测相结合在带电诊断避雷器领域的重要性;近年来,国内相关人士虽对MOA带电检测技术领域的研究有所增加,但在MOA带电检测中仍存在一些问題。

当前,国内外采用的MOA在线监测方法主要包括泄漏电流法、基波法、3次谐波法、补偿法及温度法等方法^[6],然而因MOA处于复杂的电网环境中,容易受到各种外部干扰,造成当前各种监测手段都或多或少存在缺陷,导致测量结果时有偏差。

采用何种MOA电气参量作为MOA在线监测参量更为行之有效,是当前MOA在线监测技术中的研究重点之一^[10-13]。文中以500 kV氧化锌避雷器受潮情况为例,对MOA在运行电压下的泄露电流、阻性电流、3次谐波、5次谐波等电气参量与MOA受潮的关系特性进行了研究。

1 MOA试验方法及原理

当前MOA在线状态监测特征分量主要基于MOA本身的总泄漏电流与阻性泄漏电流及其谐波分量。正常电压下MOA小电流范围内MOA电阻片的简化等效电路图见图1。由图1可知,MOA的电

阻阀片相当于一个非线性电阻与电容的并联电路,其中 I_X 、 I_R 、 I_C 分别表示总泄漏电流、全电流阻性分量、全电流容性分量。 R 为MOA阀片的非线性电阻; C 为MOA阀片的固有电容。

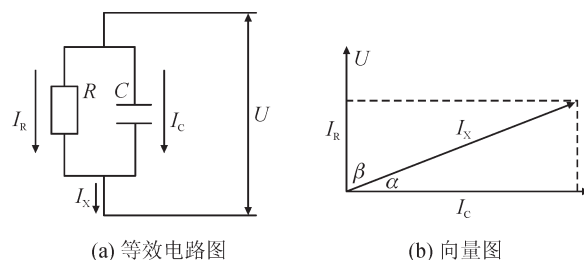


图1 氧化锌避雷器等效电路图和向量关系图

Fig. 1 Equivalent circuit and vector diagram for MOA

总泄漏电流 I_X 由呈非线性的阻性电流 I_R 与呈线性的容性电流 I_C 两部分构成^[14-16]。正常运行情况下,MOA总泄漏电流呈容性,阻性电流分量 I_R 仅占全电流的10%~20%^[17]。

试验采用型号为Y20W-444/1106的500 kV无间隙瓷外套氧化锌避雷器作为试验对象,Y20W-444/1106氧化锌避雷器的持续运行电压为355 kV(rms),直流参考电压为597,500 kV。MOA分为上、中、下3节,每节分别由35片阀片及9片铝垫片串联而成,节与节之间通过法兰连接。500 kV MOA运行电压高,元件数量多,结构复杂,高度尺寸巨大,从而造成MOA电阻片上电压分布及不均匀,为使试验结果更加准确,在500 kV MOA上端加装一个双环双层型均压环,以调节MOA上的电压分布,从而使其更加接近电网中500 kV MOA的运行状态。

试验原理图见图2。依据500 kV MOA的实际运行工况,通过工频耐压试验装置对500 kV MOA的3节同时施加频率为50 Hz,幅值为318 kV持续运行电压,其中 r 为取样电阻,MOA的各个电气参数可通过MOA阻性电流测试仪测得。试验现场图见图3。为使所测数据更加准确,防止高压接线对500 kV MOA产生电磁影响,试验中将高压引线连接于双环双层型均压环上端,并通过绝缘外套将高压引线包裹。

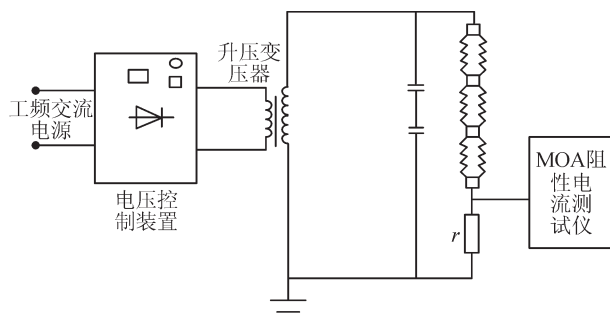


图2 试验原理图

Fig. 2 The principle diagram of the experiment



图3 试验现场图

Fig. 3 The field test

2 试验结果分析

根据大量的统计数据可知,MOA受潮是导致MOA异常和事故的主要原因^[4],因此研究MOA受潮情况下MOA各个电气参数是非常有必要的。文中以500 kV MOA受潮为例,对MOA的总泄漏电流、阻性电流分量、阻性电流3次谐波、阻性电流5次谐波、有功损耗、相位角大小与MOA受潮关系特性进行研究分析。

为研究分析MOA各个电气参数与MOA受潮关系特性,试验中将500 kV MOA上节进行了一夜的受潮处理,见表1。由表1可知,经过受潮处理的MOA上节比完好状态下MOA上节的直流1 mA参考电压219.3 kV下降了49.5%,远超规程规定的±5%,而75% $U_{1\text{ mA}}$ 电压下泄漏电流是50 μA 的2.68倍,远超规程规定的最大泄漏电流。为使试验结果更加准确,试验中将受潮处理过的避雷器节分别安装在MOA的上、中、下3个不同部位进行研究分析。

表1 避雷器试验数据

Table 1 Test dates of the arrester		
类型	直流1 mA 参考电压/kV	75%直流1 mA 参考电压下的泄漏电流/ μA
完好	上节	219.3
	中节	208.9
	下节	199.9
受潮	上节	110.8
	中节	208.9
	下节	199.9

规程规定:直流1 mA参考电压与初始值比较,变化应不大于±5%;75%直流1 mA参考电压下的泄漏电流不超过50 μA 。

试验中先对良好状态下的500 kV MOA进行了试验分析,利用工频耐压装置对500 kV MOA进行加压,采用MOA阻性电流测试仪对良好状态下的MOA进行电气参数的测量,测量结果见表2。为保证测量对比数据的准确性,将测试完的良好MOA进行拆解,将其中一节避雷器进行受潮处理。

表2 良好避雷器电气参数					
Table 2 Electrical parameters of good arrester					
全电流有效值/mA	阻性电流峰值/mA	阻性电流3次谐波/mA	阻性电流5次谐波/mA	有功损耗/W	相位角/(°)
1.529	0.151	0.039	0.029	34.250	85.970

2.1 总泄漏电流

正常MOA运行时其泄漏电流为0.2~2.0^[18-20],如表2所测良好状态下500 kV MOA的泄漏电流为1.529 mA,符合其良好状态。利用工频耐压装置对受潮位置不同的500 kV MOA分别进行120 min的加压试验,依据下、中、上的顺序将避雷器受潮节分别安装在不同位置进行试验加压,为使所测数据更加准确,每次试验之后都要对500 kV MOA进行降温处理。试验中所测全电流有效值见表3。

表3 受潮避雷器全电流有效值测量数据

Table 3 Measurement data of full current effective value of damp surge arrester			
加压时间/min	下节受潮	中节受潮	上节受潮
0	2.042	1.819	1.699
30	2.029	1.797	1.668
60	2.077	1.811	1.687
90	2.129	1.815	1.687
120	2.153	1.836	1.693

由表3可知,加压时间为0 min时,3种情况下的总泄漏电流分别为2.042、1.819、1.699 mA,比正常运行情况下的MOA总泄漏电流分别增长了33.55%、18.97%、11.12%;加压120 min时,3种情况下的总泄漏电流分别为2.153、1.836、1.693 mA,比良好状态下的MOA总泄漏电流增长了40.81%、20.08%、10.73%。由此可知下、中、上3种情况中下节避雷器受潮时流过的全电流增长率最大,上节受潮时全电流增长率最小,当MOA受潮位置不同时,全电流变化也不尽相同,受潮位置越靠近MOA下端,MOA全电流变化越明显。但总体上看3种情况

下全电流在 MOA 受潮情况下的变化率并不明显,说明全电流对 MOA 受潮反应灵敏度不够,并不能作为监测 MOA 受潮情况的重要参量。

2.2 阻性电流分量

正常的 MOA 在持续运行电压下的阻性电流峰值为 $100\sim 200\ \mu\text{A}^{[2]}$,由表 2 可知,所测良好状态下 500 kV MOA 阻性电流峰值为 0.151 mA,符合规程规定。对受潮情况下的 500 kV MOA 进行加压试验测得阻性电流峰值随加压时间的变化情况见表 4。由表 4 可知,短时间内受潮情况相同的 MOA 阻性电流峰值不会发生明显变化,但相较于正常情况下的 MOA 阻性电流峰值增幅显著。

表 4 受潮避雷器阻性电流分量测量数据

Table 4 Measurement data of resistive current component of damp surge arrester mA

加压时间/ min	下节受潮	中节受潮	上节受潮
0	0.683	0.513	0.405
30	0.667	0.493	0.388
60	0.714	0.502	0.398
90	0.764	0.514	0.395
120	0.789	0.530	0.394

由表 4 与表 2 对比可知,加压时间为 0 min 时,3 种情况下的阻性电流峰值分别为 0.683、0.513、0.405 mA,比正常运行情况下的 MOA 阻性电流峰值分别增长了 352.32%、239.74%、168.21%;加压 120 min 时,3 种情况下的阻性电流峰值分别为 0.789、0.530、0.394 mA,比良好状态下的 MOA 阻性电流峰值增长了 422.52%、251.00%、160.93%。由此可知,当 MOA 阀片受潮时,流过其上的阻性电流分量会明显增大,并且随受潮位置的不同而增长幅度也不尽相同,受潮位置越靠近 MOA 上端阻性电流峰值的增长率越小,但相较于总泄漏电流的变化情况,阻性电流峰值对 MOA 受潮情况反应更加灵敏。因此阻性电流峰值是对 MOA 是否受潮进行初步判断的一个重要参量。在预防性试验规程中规定:当阻性电流增加到初始值的 1 倍时应停电检查^[2]。

2.3 阻性电流 3 次谐波

对 3 种不同情况下的 500 kV MOA 分别进行加压试验所测得的 MOA 阻性电流 3 次谐波变化情况见表 5。由表 5 可知,当加压 0 min 时,3 种情况下 MOA 的阻性电流 3 次谐波分别为 0.175、0.127、0.052 mA,比良好状态下 MOA 阻性电流 3 次谐波分别增长了 348.72%、225.64%、33.33%;当加压 120 min

时,3 种情况下 MOA 的阻性电流 3 次谐波分别为 0.181、0.090、0.060 mA,比良好状态下 MOA 阻性电流 3 次谐波分别增长了 364.10%、130.77%、53.85%。由此可知当 MOA 下节、中节受潮时 MOA 阻性电流 3 次谐波增长显著,而当受潮部位位于 MOA 上节时,阻性电流 3 次谐波的变化率远小于其他两种情况。

表 5 受潮避雷器阻性电流 3 次谐波测量数据

Table 5 Measurement data of the three harmonic of resistive current of damp surge arrester mA

加压时间/min	下节受潮	中节受潮	上节受潮
0	0.175	0.127	0.052
30	0.209	0.121	0.056
60	0.179	0.093	0.067
90	0.188	0.101	0.060
120	0.181	0.090	0.060

在 MOA 受潮时,阻性电流 3 次谐波较阻性电流基波分量相对增加较小,而当 MOA 老化时,阀片的非线性特性会变差,阻性电流高次谐波就会显著增大,而阻性电流基波分量相对增加较小。将表 4、5 推出的增长率相对比可知,当受潮部位位于 MOA 上节时,阻性电流峰值变化明显,而阻性电流 3 次谐波增长率相对较低,由此可得结合阻性电流峰值与阻性电流 3 次谐波可以作为判别 MOA 受潮位置的依据。

2.4 阻性电流 5 次谐波

对 3 种不同情况下的 500 kV MOA 分别进行加压试验所测得的 MOA 阻性电流 5 次谐波变化情况见表 6。由表 6 可知,当加压 0 min 时,3 种情况下 MOA 阻性电流 5 次谐波分别为 0.154、0.123、0.104 mA,比良好状态下 MOA 阻性电流 5 次谐波增长了 431.03%、324.14%、258.62%;当加压 120 min 时,3 种情况下 MOA 的阻性电流 5 次谐波分别为 0.168、0.135、0.123 mA,比良好状态下 MOA 阻性电流 5 次谐波增长了 479.31%、365.52%、324.14%。由增长率可知,阻性电流 5 次谐波的变化率虽随受潮位置的上升而减小,但 3 种情况下变化率都非常显著。

对比 3 种情况下 MOA 阻性电流 3 次谐波与 5 次谐波的增长率可知,当 MOA 受潮时,阻性电流 5 次谐波的增长率大于阻性电流 3 次谐波,说明阻性电流 5 次谐波对 MOA 受潮情况反应足够灵敏,因此阻性电流 5 次谐波也可作为监测 MOA 运行状态的一个重要依据。

2.5 有功损耗

对 3 种不同情况下的 500 kV MOA 分别进行加压

表 6 受潮避雷器阻性电流 5 次谐波测量数据

Table 6 Measurement data of the five harmonic of resistive current of damp surge arrester mA

加压时间/min	下节受潮	中节受潮	上节受潮
0	0.154	0.123	0.104
30	0.137	0.107	0.106
60	0.144	0.115	0.117
90	0.154	0.123	0.123
120	0.168	0.135	0.123

试验所测得的 MOA 有功损耗变化情况见表 7。

表 7 受潮避雷器有功损耗测量数据

Table 7 Measurement data of active loss of damp surge arrester W

加压时间/min	下节受潮	中节受潮	上节受潮
0	153.9	115.3	91.61
30	150.2	110.0	87.80
60	160.8	113.2	90.77
90	173.0	116.1	89.95
120	178.6	120.9	90.32

由表 7 可知,当加压 0 min 时,3 种情况下 MOA 有功损耗分别为 153.9、115.3、91.61 W,比良好状态下 MOA 有功损耗增长了 349.34%、236.64%、167.47%;当加压 120 min 时,3 种情况下 MOA 有功损耗分别为 178.6、120.9、90.32 W,比良好状态下 MOA 有功损耗增长了 421.46%、253%、163.71%,由此可知,当 MOA 受潮时,有功损耗明显增加,并且受潮位置越靠近 MOA 上端,有功损耗的增长率越低。

当 MOA 内部受潮时,流过 MOA 阀片的阻性电流分量增大,有功损耗随之上升,导致阀片温度升高,超过 MOA 的散热能力,最终造成受潮部位的温度高于非受潮部位,这就为红外成像检测提供了依据,因此对 MOA 有功损耗的测量是非常有必要的。

2.6 相位角

MOA 全电流包含阻性电流与容性电流,因此在正常运行电压持续作用下,MOA 电压与电流的相角在 80°~90°^[2]。由表 2 可知,良好状态下 500 kV MOA 相位角为 85.97°,符合常规状态。对 3 种不同情况下的 500 kV MOA 分别进行加压试验所测得的相位角变化情况见表 8。

由表 8 可知,当加压时间为 0 min 时,3 种情况下 MOA 的相位角分别为 76.27°、78.45°、80.27°,比良好

表 8 受潮避雷器相位角测量数据

Table 8 Measurement data of phase angle of damp surge arrester °

加压时间/min	下节受潮	中节受潮	上节受潮
0	76.27	78.45	80.27
30	76.49	78.79	80.50
60	75.88	78.65	80.38
90	75.23	78.42	80.45
120	74.92	78.20	80.49

状态下 MOA 的相位角分别减小了 11.28%、8.75%、6.63%;当加压时间为 120 min 时,3 种情况下 MOA 的相位角分别为 74.92°、78.20°、80.49°,比良好状态下 MOA 的相位角分别减小了 12.85%、9.04%、6.37%。由此可知,MOA 的相位角随加压时间的增长变化并不显著,并且受潮位置越靠近 MOA 上端 MOA 相位角变化幅度越小。

当 MOA 受潮时,由于阻性电流增大而容性电流变化幅度较小,所以电压与电流之间的相角差将会降到 80°以下。表 8 所测数据符合其规律。

3 结论

通过对 500 kV MOA 不同受潮位置下各个电气参数的试验研究分析,可以得出以下结论:

- 1)MOA 受潮位置不同,其电气参数的变化率也不同,受潮位置越靠近 MOA 下端,MOA 各个电气参数的变化也就越明显。
- 2)全电流有效值对 MOA 受潮的反应不够灵敏,当受潮部位位于 MOA 上端时,MOA 全电流基本无变化,因此全电流有效值不适合作为在线监测 MOA 状态的特征参量。
- 3)阻性电流峰值与阻性电流 3 次谐波相结合可作为判断 MOA 受潮位置的重要依据之一。
- 4)阻性电流 5 次谐波与有功损耗对 MOA 受潮状况反应灵敏度高,虽仍随受潮部位上升而导致增长率下降,但 3 种情况下变化幅度都很显著,可作为在线监测 MOA 状态的特征参量。
- 5)相位角对 MOA 受潮状态的反应灵敏度不高,可作为辅助参量,为检测 MOA 是否受潮作出初步判断。

参考文献:

[1] 高峰,郭洁,徐欣,等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术,2009,35(11):2629-

2633.
GAO Feng, GUO Jie, XU Xin, et al. Relation between resistive current and moa affected with damp[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2629-2633.
- [2] 俞震华. 氧化锌避雷器故障分析及性能判断方法[J]. 电力建设, 2010, 31(11): 89-93.
YU Zhenhua. Fault analysis and performance evaluation for metal oxide arresters[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(11): 89-93.
- [3] 罗容波, 王 岩, 李国伟. 带电检测技术在避雷器状态诊断中的成功应用[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 53-57.
LUO Rongbo, WANG Yan, LI Guowei. A successful application of the live detection technology in the diagnosis of lightning arrester state[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6): 53-57.
- [4] 朱海豹, 黄 锐, 夏晓波, 等. 金属氧化物避雷器带电检测数据异常的诊断及分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(2): 68-71.
ZHU Haimao, HUANG Rui, XIA Xiaobo, et al. Diagnosis and analysis on the live detection data abnormal of MOA[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(2): 68-71.
- [5] 李顺尧. 金属氧化锌避雷器测试方法对比与分析[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 94-97.
LI Shun Yao. Comparison and analysis of MOA test methods[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 94-97.
- [6] 张 雨, 朱泽慧, 张春辉, 等. 35 kV 氧化锌避雷器直流 1 mA 电压值试验分析[J]. 电瓷避雷器, 2015(3): 115-119.
ZHANG Yu, ZHU Zehui, ZHANG Chunhui, et al. Analysis on the test about 1 mA DC voltage value of 35 kV MOA[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3): 115-119.
- [7] 严玉婷, 黄炜昭, 江建武, 等. 避雷器带电测试的原理及仪器比较和现场事故缺陷分析[J]. 电瓷避雷器, 2015(3): 115-119.
YUAN Yuting, HUANG Weizhao, JIANG Jianwu, et al. Principle and instrument comparison of arrester live line test and analysis on the flaw in field[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3): 115-119.
- [8] 王肖波. 基于带电检测技术的金属氧化物避雷器故障诊断与实例分析[J]. 电瓷避雷器, 2015(3): 69-73.
WANG Xiaobo. MOA failure diagnosis and practical case analysis based on live detection technology[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3): 69-73.
- [9] IMAI T, UDAGAWA T, ANDO H, et al. Development of high gradient zinc-oxide nonlinear resistors and their application to surge arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1182-1187.
- [10] SHICHIMIYA S, YAMAGUCHI M, FURUSE N, et al. Development of advanced arresters for GIS with new zinc-oxide elements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 465-471.
- [11] 庞 博, 刘树清, 王树军, 等. 110 kV 线路绝缘子式避雷器方案分析及仿真验证[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 177-183.
PANG Bo, LIU Shuqing, WANG Shujun, et al. Design and simulation of the lightning-protective insulator for 110 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 177-183.
- [12] 苗发金. 金属氧化物电阻片电容特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(5): 102-105.
MIAO Jinfa. Study on the capacitance characteristics of metal-oxide varistor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(5): 102-105.
- [13] 王保山, 刘 斌, 张 曦, 等. 交流特高压避雷器电压分布的测量与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1781-1787.
WANG Baoshan, LIU Bin, ZHANG Xi, et al. Measurement and analysis about the potential distribution of the 1 000 kV metal-oxide surge arrester[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1781-1787.
- [14] 王保山, 刘 洋, 汤 霖, 等. 交流无间隙金属氧化物避雷器的电压分布特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 38-44.
WANG Baoshan, LIU Yang, TANG Lin, et al. Research on characteristics of voltage distribution of the metal oxide arrester without gap used for ac system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 38-44.
- [15] 张金岗. 红外测温技术在氧化锌避雷器带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 200-204.
ZHANG Jingang. Application of infrared temperature measurement technology to live detection of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 200-204.
- [16] 车文俊, 张晓星, 李明刚, 等. 1 000 kV GIS 型和瓷套型避雷器研发综述[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 230-236.
CHE Wenjun, ZHANG Xiaoxing, LI Minggang, et al. Research and development overview of 1 000 kV GIS and porcelain housed surge arresters[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 230-236.
- [17] 董莉娜, 胡 可, 王微波, 等. 小波消噪在 10 kV 金属氧化物避雷器在线检测中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 891-896.
DONG Lina, HU Ke, WANG Weibo, et al. Application of wavelet de-noise in on-line detection of 10 kV metal oxide arresters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 891-896.
- [18] 谭俊源, 唐 军, 刘晓庭, 等. 珠江三角洲某地区雷电特征对 10 kV 配网用避雷器故障的影响分析[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 113-119.
TAN Junyuan, TANG Jun, LIU Xiaoting, et al. Effects of lightning features on arrester faults in 10 kV distribution network in the pearl river delta[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 113-119.
- [19] 周文俊, 喻剑辉, 陈 荣, 等. 雷电流全参数及避雷器状态在线监测研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2054-

- 180-183.
- [13] 王文洪,何满棠. 252 kV GIS 设备罐体发热缺陷的原因分析[J]. 高压电器,2009,45(3):148-150.
WANG Wenhong, HE Mantang. Analysis of tank heating fault of 252 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(3): 148-150.
- [14] 季严松,王承玉,杨 韧,等. SF₆气体分解产物检测技术及其在 GIS 设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器,2011,47(2):100-103.
JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(2):100-103.
- [15] 田兴旺,唐晓玲,吕家圣. 红外诊断在高压直流输电系统阀电抗器发热故障分析中的应用[J]. 高压电器,2008,44(5):469-471.
TIAN Xingwang, TANG Xiaoling, LYU Jiasheng. Application of infrared diagnosis in valve reactor overheat analysis of HVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2008,44(5): 469-471.
- [16] 曾喜闻,凌 云. GIS 电流互感器局部过热原因分析及处理[J]. 湖北电力,2009,33(3):15.
ZENG Xiwen, LING Yun. Cause analysis and treatment for partial excess temperature of GIS TA[J]. Hubei Electric Power, 2009,33(3):15.
- [17] 刘 欢,邓 科,付汉江,等. SF₆ 气体分解物与 GIS 设备运行状态关系的探讨[J]. 高压电器,2013,49(10):127-132.
LIU Huan, DENG Ke, FU Hanjiang, et al. Investigation on the relationship between SF₆ gas decomposition and GIS equipment operating status[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(10):127-132.
- [18] 刘 鹏,金海云,石惠承,等. 特高压直流套管用环氧树脂/皱纹纸复合绝缘体系介电性能的研究[J]. 高压电器,2009,45(5):6-8.
LIU Peng, JIN Haiyun, SHI Huicheng, et al. Investigation on dielectric properties of epoxy/crepe paper composites for ultra-high voltage DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(5): 6-8.
- [19] 刘小刚,王茂忠,种芝艺,等. ± 500 kV 阀厅电气连接及金具设计特点[J]. 电力建设,2011,32(9):24-29.
LIU Xiaogang, WANG Maozhong, CHONG Zhiyi, et al. Electric connections and fittings design in vall hall of ± 500 kV Baoji converter station[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(9):24-29.
- [20] 王 伟,韩金华,郭运明,等. 一起进口套管烧损故障情况介绍[J]. 高压电器,2012,48(2):115-122.
WANG Wei, HAN Jinhua, GUO Yunming, et al. Analysis of a burned-out failure of transformer bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(2):115-122.
- [21] KONCHITS V V, MYSHKIN N K. 电接触理论、应用与技术[M]. 许良军、芦 娜、林雪燕,译. 北京:机械工业出版社,2010.
KONCHITS V V, MYSHKIN N K. Electrical contacts fundamentals, applications and technology[M]. XU Liangjun, LU Na, LIN Xueyan, Translate. Beijing: China Machine Press, 2010.
- 张启浩(1986—),男,学士,主要从事高压直流输电设备检修维护工作。
- 吴德贯(1987—),男,学士,主要从事高压直流输电设备检修试验工作。
- 马正霖(1990—),男,学士,主要从事高压直流输电设备检修试验工作。

(上接第 238 页)

2058.
ZHOU Wenjun, YU Jianhui, CHEN Rong, et al. Research on whole parameters of lightning current waveform and on-line monitoring of arresters[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(10):2054-2058.
- [20] 李志兵,颜湘莲,王 浩,等. 金属氧化物避雷器在陡波下的试验与模型分析[J]. 高电压技术,2012,38(10):2698-2706.
LI Zhibing, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Analysis of test and model for metal oxide arrester under steep - front wave[J]. High Voltage Engineering, 2012,38(10):2698-2706.
- 史志强(1991—),男,硕士,研究生,研究方向为电力系统过电压等。