

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.026

## 换流站极母线直流避雷器监测器不动作原因分析

肖冕<sup>1,2,3</sup>, 束龙<sup>1,2,3</sup>, 吴传奇<sup>1,2,3</sup>, 李劲彬<sup>1,2,3</sup>, 陈隽<sup>1,2</sup>,  
孟毅<sup>1,2</sup>, 文雅钦<sup>1,2</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430077; 2. 国家电网有限公司高压电气设备现场试验与评估技术实验室, 武汉 430077; 3. 湖北大地杂散电流与能源装备安全野外科学观测研究站, 武汉 430077)

**摘要:** 监测器串接于金属氧化物避雷器接地端, 用于记录避雷器的动作次数以及泄漏电流。标准 JB/T 10492—2025 和 GB/T 24845—2018 对监测器在 8/20  $\mu\text{s}$  波形下的动作电流做了规定, 而对其他冲击电流波形没有做出要求。在实际系统运行中, 流过避雷器的电流波形并非都为标准 8/20  $\mu\text{s}$  雷电流波形, 导致可能存在避雷器监测器不动作情况。文中针对一起换流站极母线直流避雷器监测器不动作的故障案例, 逐项开展试验工作, 分析监测器不动作原因。试验结果表明: 电流波形越长, 波头越缓, 避雷器监测器的动作电流越大。进一步推论, 在本次故障案例中, 流经避雷器的电流具有更宽(约 6.5 ms)的时长, 导致要比规程 8/20  $\mu\text{s}$  测试波形更大的电流幅值才能触发监测器动作, 且该动作电流很可能大于 700 A。

**关键词:** 避雷器; 监测器; 不动作; 动作电流

## Cause Analysis of Inaction of the DC Arrester Monitor on the Pole Bus of a Converter Station

XIAO Mian<sup>1,2,3</sup>, SHU Long<sup>1,2,3</sup>, WU Chuanqi<sup>1,2,3</sup>, LI Jinbin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jun<sup>1,2</sup>,  
MENG Yi<sup>1,2</sup>, WEN Yaqin<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. SGCC Laboratory of High-voltage Electrical Equipment Field Testing and Evaluation Technology, Wuhan 430077, China; 3. Hubei Observation and Research Station of Earth Stray Currents and Energy Equipment Safety, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The monitor is connected in series to the earth terminal of the metal oxide arrester and is used to record the arrester operation numbers as well as the leakage current. Standards JB/T 10492—2025 and GB/T 24845—2018 specify the operating current of the monitor at the standard 8/20  $\mu\text{s}$  waveform, while no requirements are made for other impulse current waveforms. In actual system operation, the current waveform flowing through the arrester is not always the standard 8/20  $\mu\text{s}$  lightning current waveform, which may lead to inaction of the arrester monitor. In this paper, for the inaction case of a DC arrester monitor on the pole bus of the converter station, the test work is carried out item by item to analyze the causes. The test results show that the longer the current waveform and the gentler the wavefront, the larger the operating current of the arrester monitor. It can be further inferred that in this fault case, the current flowing through the arrester has a longer duration (approximately 6.5 ms), resulting in the need for a larger current amplitude to trigger the standard 8/20  $\mu\text{s}$  test waveform, and this operating current is likely to be greater than 700 A.

**Key words:** metal oxide arrester(MOA); monitor; non-operation; operating current

## 0 引言

避雷器能够保护系统中各类设备免受雷电过

电压、操作过电压等等的危害, 是电力系统中重要且广泛应用的过电压保护装置<sup>[1-5]</sup>。大电流通过避雷器后, 会对避雷器微观结构造成损坏, 轻则影响避雷器

收稿日期:2025-09-10; 修回日期:2025-11-28

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5700-202199547A-0-5-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5700-202199547A-0-5-ZN).

的运行寿命,重则使避雷器直接退出运行<sup>[6-17]</sup>。

监测器与避雷器串接于电网中运行,一方面能够显示避雷器运行的泄漏电流,另一方面能够记录避雷器通过大电流后的动作次数<sup>[18]</sup>。当避雷器通过一定次数大电流时,需要检修人员对避雷器进行预防性试验,以确定避雷器内部电阻片是否有缺陷。

目前市面上监测器分阀片型和间隙型两种<sup>[19]</sup>。其中,阀片型的监测器采用氧化锌电阻片和电子回路并联结构,最大通流容量为2 500 A,适用于750 kV及以下电压等级避雷器。间隙型监测器采用间隙和电子回路并联结构,具有很高的通流容量,适用于特高压交直流系统中的多柱并联避雷器。但是间隙型监测器存在小电流区域间隙击穿不稳定的问题,使得间隙结构下限动作电流范围比较宽。

现有监测器的型式试验和出厂试验,依据JB/T 10492—2025 标准对放电计数器动作电流的上、下限进行测试<sup>[20]</sup>。然而,JB/T 10492—2025 标准中仅规定了在8/20 μs 波形下监测器的下限动作电流为50 A,而对其它冲击电流波形下放电计数器的动作特性却没有做出规定。在实际系统运行当中,流过避雷器的电流波形并非都为标准的8/20 μs 雷电流波形。由此,可能引起实际系统运行中,出现避雷器监测器不动作的情况。

文中针对一起换流站直流避雷器监测器不动作事故案例,开展多项试验工作,进行原因分析。相关研究结论,对于避雷器监测器产品的优化设计和验收试验具有一定参考价值。

## 1 监测器不动作案例

### 1.1 案例基本情况

某日,某换流站极 II 线路故障跳闸,一次全压再启动成功。综合判断,此次故障为雷电绕击造成的故障跳闸。该雷电流通过导线至杆塔塔身水平包钢空气间隙放电,释放了大部分能量,还有一部分雷电流通过线路分别流向两端的换流站。

该换流站站内故障录波系统发现极 II 直流母线保护出现了差动电流,极差动保护也出现了差动电流,差动电流持续约 6.5 ms,最大电流 1 327 A。经分析直流母线测量点和直流线路电流测量点之间存在电流泄放通道,两测量点之间的主设备包括:两组平波电抗器、避雷器 F<sub>3</sub>/F<sub>4</sub>、直流分压器、电容器、直流滤波器。以上设备外观检查未发现异常,而唯一的泄流路径只有直流避雷器 F<sub>3</sub>/F<sub>4</sub>。线路故障发生后,运行人员对极母线避雷器 F<sub>3</sub>/F<sub>4</sub> 监测器检查,未发现监测器计数器动作。文中旨在分析监测器不动作原因。

### 1.2 监测器动作原理

本案例中监测器结构为间隙型,电路原理图见图 1。正常运行时,避雷器泄漏电流通过电流表回路。电流表回路电阻由 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 并联,串联稳压管 D<sub>3</sub> 后的电阻 R<sub>11</sub>。当有大电流通过监测器时,电流表回路两端电压瞬间升高,达到取样间隙击穿电压时,间隙击穿。图 1 中的两个穿心线圈感应到电流,通过整流桥 BG<sub>1</sub>、BG<sub>2</sub> 对电容 C<sub>1</sub> 进行充电(两个线圈为了增加电容充电量,以降低下限动作电流),充电后的电容对计数器 JS 进行放电,从而达到记录动作次数的作用。

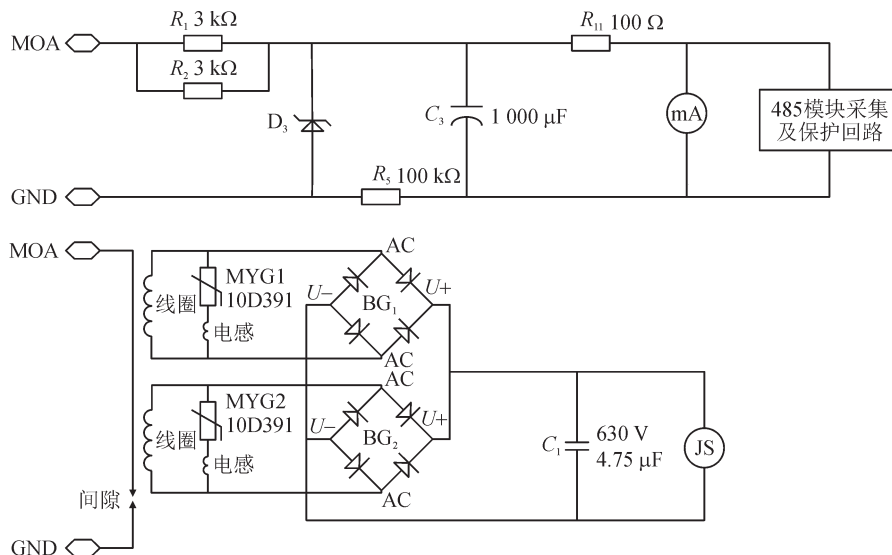


图 1 间隙型监测器结构电路图

Fig. 1 Circuit diagram of the gap-type monitor

JB/T 10492—2025《金属氧化物避雷器用监测装置》中规定了监测器动作电流的上限值和下限值,它是表征计数器必须具备的正确动作电流值。标准中附录A“1 000 kV 特高压交流试验示范工程避雷器用监测器”给出了监测器上限动作电流(峰值)为50 kA,下限动作电流(峰值)为200 A。GB/T 24845—2018《1 000 kV 交流系统用无间隙金属氧化物避雷器技术规范》中附录D“1 000 kV 交流系统无间隙金属氧化物避雷器用监测器”对下限计数电流规定为100~200 A,即大于200 A应保证可靠动作,小于100 A应保证可靠不动作。特高压直流避雷器用监测器参照执行JB/T 10492—2025和GB/T 24845—2018标准。

## 2 监测器试验分析

对该故障不动作监测器,逐项开展多种试验进行分析,主要包括:①电流表性能测试;②上限、下限动作电流测量试验;③不同温度下的下限动作电流测量试验;④不同电流波形下的监测器动作性能试验;⑤密封试验和解体检查等。试验结果及分析如下。

### 2.1 电流表性能测试

对监测器的电流表进行性能测试,给定的标准电流大小分别为50、100、150、200  $\mu\text{A}$ ,要求误差小于5%。试验记录见表1、图2。结果表明,该监测器的电流表性能满足要求。

表1 电流表性能测试结果

Table 1 Results of the ammeter performance test

极性	标准值/ $\mu\text{A}$	测量值/ $\mu\text{A}$	检验误差/%
正	50	50	0.0
	100	100	0.0
	150	148	1.3
	200	198	1.0
负	-50	-50	0.0
	-100	-98	2.0
	-150	-146	2.7
	-200	-198	1.0



图2 电流表性能测试

Fig. 2 Ammeter performance test

### 2.2 上限、下限动作电流试验

#### 2.2.1 上限动作电流

把监测器串联在冲击电流试验回路中,分别施加正、负极性8/20  $\mu\text{s}$ 冲击电流20 kA各5次,每相邻两次试验的时间间隔为50~60 s。试验波形见图3。图3结果表明,监测器在每次冲击后均能够准确做出动作指示。

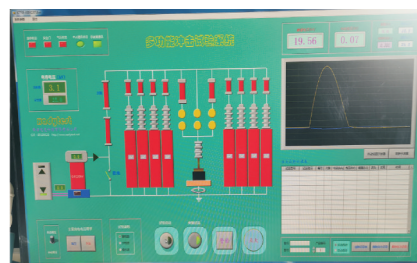


图3 上限动作电流试验波形

Fig. 3 Current of the maximum operating current test

#### 2.2.2 下限动作电流

JB/T 10492—2025、GB/T 24845—2018标准中规定:监测装置的动作电流是指监测装置能够可靠记录并作出正确指示的具有8/20  $\mu\text{s}$ 波形的雷电冲击电流峰值,监测装置的下限动作电流是指监测装置的动作电流下限值。下限计数电流大于200 A应保证可靠动作,小于100 A应保证可靠不动作。

试验中,将避雷器计数器校验仪高、低压输出端分别接到监测器的高、低压端,施加不小于200 A的正极性8/20  $\mu\text{s}$ 雷电冲击电流,共5次,每相邻两次试验的时间间隔为50~60 s。更换极性,用同样方法进行下限动作电流试验。要求监测器在每次冲击后均应准确做出动作指示。记录监测器的下限动作电流见表2,典型电流波形见图4。试验结果满足要求。

表2 下限动作电流试验结果

Table 2 Results of the minimum operating current test

正极性下限动作电流/A	负极性下限动作电流/A
222	207
212	218
208	202
220	226
214	220

### 2.3 不同温度下的下限动作电流试验

在-20  $^{\circ}\text{C}$ 、+40  $^{\circ}\text{C}$ 下测试监测器的下限动作电流见表3,试验电流波形见图5。结果表明。

1)监测器在-20  $^{\circ}\text{C}$ 环境静置至少4 h,取出后10 min内进行下限动作电流试验,结果均可靠动作。

2)监测器在+40  $^{\circ}\text{C}$ 环境静置至少4 h,取出后

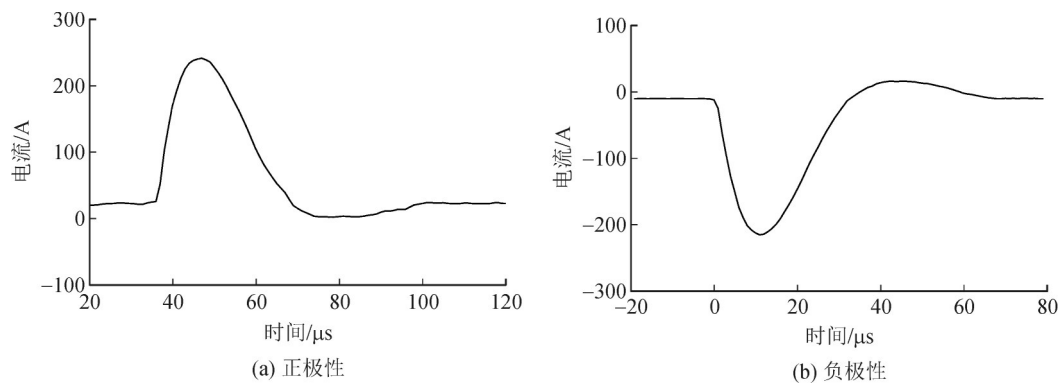


图4 下限动作电流试验波形

Fig. 4 Current of the minimum operating current test

表3 不同温度下的下限动作电流试验结果

Table 3 Results of the minimum operating current test at different temperatures A

正极性		负极性	
-20℃动作 电流	+40℃动作 电流	-20℃动作 电流	+40℃动作 电流
226	222	238	191
236	220	230	198
238	215	242	210
240	224	222	215
220	204	225	220

10 min内进行下限动作电流试验,结果均可靠动作。

## 2.4 不同波形下的下限动作电流试验

### 2.4.1 8/20 μs冲击电流波形

施加8/20 μs波形,改变避雷器计数器校验仪充电电压值,从1 kV调到3 kV,测量间隙放电电压值和计数器计数最小电流值,试验数据和试验波形分别见表4、图6。

### 2.4.2 22 ms方波

把监测器串联在方波冲击电流试验回路中,调节冲击电流发生器充电电压值,测量计数器计数的最小电流值。试验数据和电流波形分别见表5、图7。

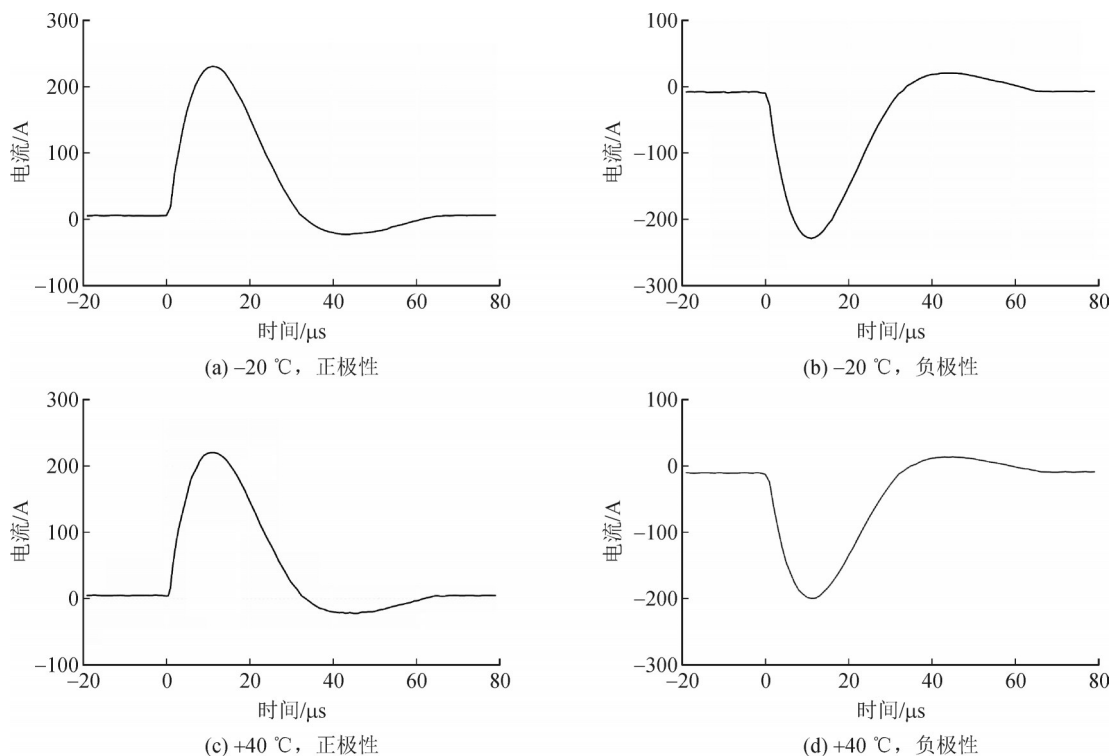


图5 不同温度下的下限动作电流试验波形

Fig. 5 Current of the minimum operating current test at different temperatures

表4 8/20 μs波形下间隙放电电压及计数动作电流数据

Table 4 Test data of the gap discharge voltage and counting operating current under the waveform of 8/20 μs

下限动作 电流/A	不动作 电压/kV	计数器动 作/不动作	下限动作 电流/A	不动作 电压/kV	计数器动 作/不动作	下限动作 电流/A	不动作 电压/kV	计数器动 作/不动作
0	3.60	×	250	0.00	√	220	0.00	√
238	0.00	√	252	0.00	√	230	0.00	√
226	0.00	√	218	0.00	√	214	0.00	√
224	0.00	√	202	0.00	√	198	0.00	√
0	3.50	×	0	3.29	×	0	3.42	×
222	0.00	√	0	3.50	×	0	3.11	×
0	3.44	×	0	3.56	×	254	0.00	√
214	0.00	√	0	3.64	×	222	0.00	√
224	0.00	√	252	0.00	√	212	0.00	√
206	0.00	√	264	0.00	√	0	3.53	×
0	3.66	×	238	0.00	√	220	0.00	√
0	3.70	×	232	0.00	√	212	0.00	√
0	3.50	×	226	0.00	√	208	0.00	√
0	3.40	×	242	0.00	√	0	3.64	×

注：“√”表示计数器动作，“×”表示计数器不动作(下同)。

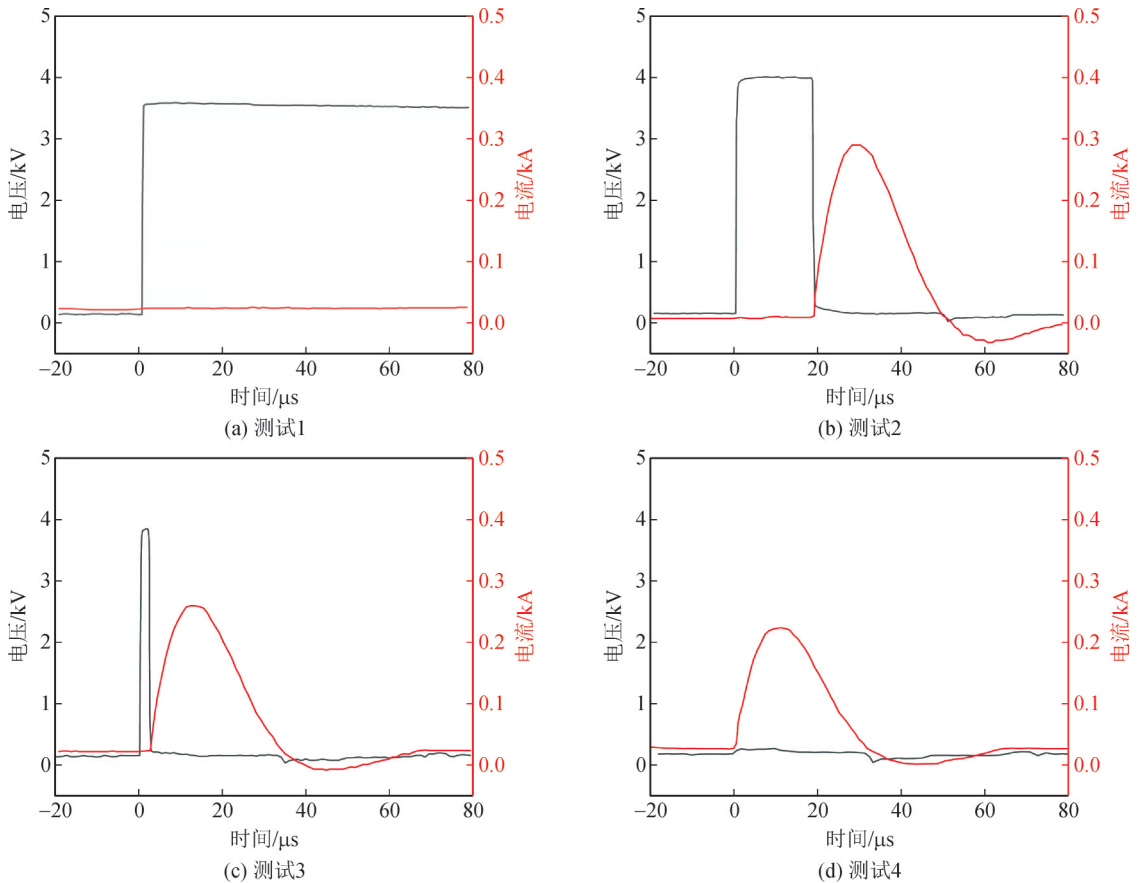


图6 8/20 μs波形下间隙放电电压及计数动作电流试验波形

Fig. 6 Test waveforms of the gap discharge voltage and counting operating current under the waveform of 8/20 μs

表5 2 ms方波下计数动作电流试验数据

Table 5 Test data of the counting operating current under 2 ms square wave

电流/A	动作/不动作	电流/A	动作/不动作	电流/A	动作/不动作	电流/A	动作/不动作
126	×	296	√	308	√	298	×
187	×	252	×	295	×	776	√
204	×	270	×	292	×	284	×
271	×	303	√	292	×	316	√
298	√	296	√	280	×	308	√
296	√	270	×	318	√	590	√
272	√	261	√	325	√	225	×
280	√	263	×	320	√	228	×
265	×	266	×	313	×	282	×
250	×	267	×	327	×	294	×
285	×	315	√	308	√	310	√
298	√	301	√	308	√		

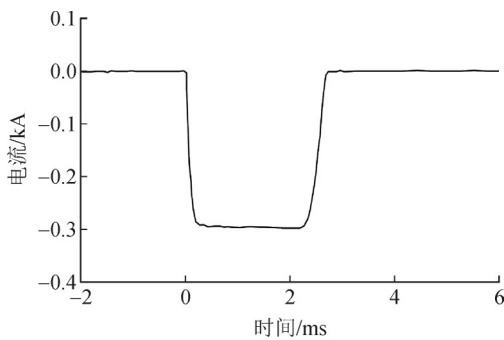


图7 2 ms方波下计数动作电流试验波形

Fig. 7 Test waveforms of the counting operating current under 2 ms square wave

2.4.3 200 μs 正弦波

把监测器串联在正弦波冲击电流试验回路中, 通过调节冲击电流发生器充电电压值, 测量计数器计数的最小电流值。试验数据和波形分别见表6、图8。

表6 200 μs 正弦波计数动作电流试验数据

Table 6 Test data of the counting operating current under 200 μs sine wave

电流/A	580	600	610	615	570
动作/不动作	×	√	√	√	×

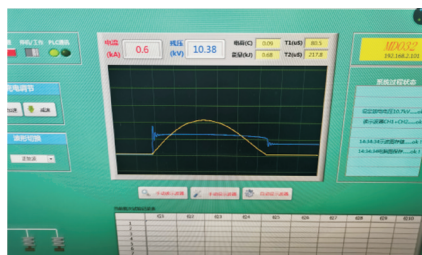


图8 200 μs 正弦波下计数动作电流试验波形

Fig. 8 Test waveforms of the counting operating current under 200 μs sine wave

2.4.4 10 ms 方波

把监测器串联在方波冲击电流试验回路中, 通过调节冲击电流发生器充电电压值, 测量计数器计数的最小电流值。试验数据见表7, 试验电流波形见图9。

表7 10 ms 方波下计数动作电流试验数据

Table 7 Test data of the counting operating current under 10 ms square wave

电流/A	动作/不动作	电流/A	动作/不动作
193	×	754	×
202	×	450	×
238	×	635	×
251	×	694	×
296	×		

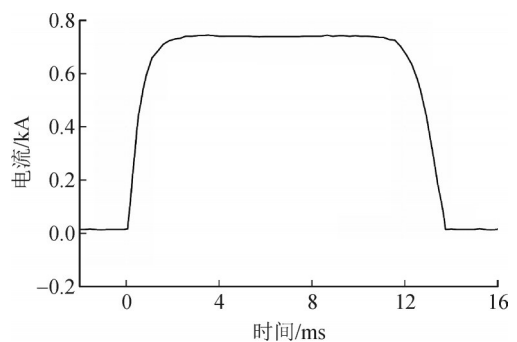


图9 10 ms方波下计数动作电流试验波形

Fig. 9 Test waveforms of the counting operating current under 10 ms square wave

2.4.5 10 ms 正弦半波

把监测器串联在10 ms 正弦半波冲击电流试验回路中, 通过调节冲击电流发生器充电电压值, 测量计数器计数的最小电流值。对计数器分流施加495、588 A幅值的10 ms 正弦半波冲击电流, 计数器未动作。由于作为负载的MOA 阀片通流能力限制,

最多只能耐受近 600 A 试验电流,故无法继续加大试验电流测试。试验波形见图 10。

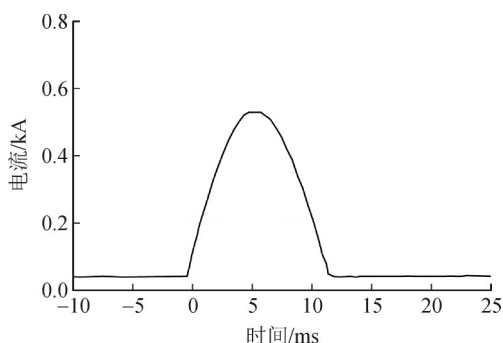


图 10 10 ms 正弦半波下计数动作电流试验波形

Fig. 10 Test waveforms of the counting operating current under 10 ms sinusoidal half wave

### 2.5 密封试验和解体检查

1)密封试验:把监测器放入负压检漏仪中,抽真空至 -0.025 MPa., 保压时间 3 min, 在保压时间内,无连续性气泡溢出。试验现场见图 11。



图 11 密封试验

Fig. 11 Sealing test

2)解体检查:拆下监测器的防爆压板、防爆板、压圈、玻璃面板、铝面板,检查元器件和电气回路、间隙回路,绘制电气原理图(见图 1),分析计数原理。

### 3 监测器不动作原因分析

雷电流经过线路传输时,因线路的阻抗、感抗和容抗使得波形发生变化,最终形成站内获得的极差动电流波形,该脉冲波形为正极性,持续时间大约为 6.5 ms,比工频半波电流周期略小,最大电流峰值为 1 327 A,波形见图 12。该过电压最高电压为 1 382 kV,经两个极母线避雷器 F<sub>3</sub>/F<sub>4</sub>分流,每个避雷器监测器流过电流约 664 A。根据厂家提供的 DB 避雷器伏安特性曲线见图 13,在 1 382 kV 电压下,直流避雷器动作电流约为 700 A 左右,吻合上述两个避雷器分流数据分析。

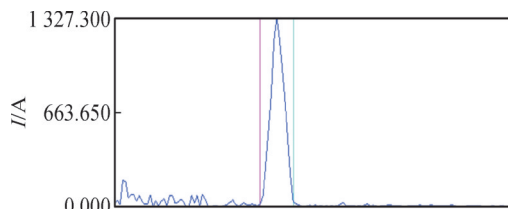


图 12 站内获得的差动电流波形

Fig. 12 Differential current waveforms obtained at the station

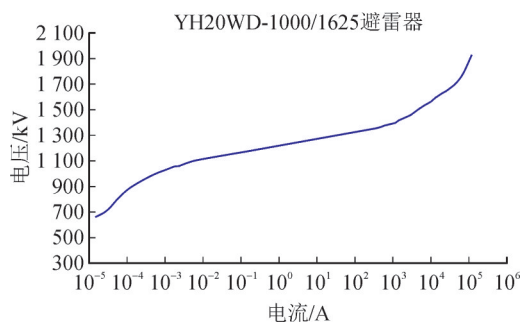


图 13 厂家提供的 DB 避雷器伏安特性曲线

Fig. 13 DB lightning arrester voltammetric characteristic curves from the manufacturer

由于没有足够的元器件,仅依靠厂内现有试验设备,无法调节出适合的放电回路参数,以获得类似差动电流波形的脉冲试验电流,该脉冲电流不是规程规定的 8/20 μs 冲击电流,其持续时间更接近工频电流半波周期。

从监测器的工作原理分析,监测器主回路间隙放电后,通过冲击电流,二次线圈感应出一定幅值的冲击电压,此电压经回路整流后为电容器充电,电容器储存的电能驱动计数装置计数。

对 8/20、200 μs 波形冲击电流下监测器回路线圈两端感应的电压进行测试,试验结果见表 8,试验波形见图 14。

表 8 8/20、200 μs 正弦波形线圈电压试验数据

Table 8 Test data of the coil voltage under 8/20 μs wave, 200 μs sine wave

8/20 μs 雷电流		200 μs 正弦波冲击电流	
电流/A	线圈电压/V	电流/A	线圈电压/V
420.0	48.4	421.0	35.6
352.0	41.2	28.8	3.6
324.0	38.0	166.0	19.2
312.0	36.0	318.0	30.0
448.0	50.8	494.0	38.4

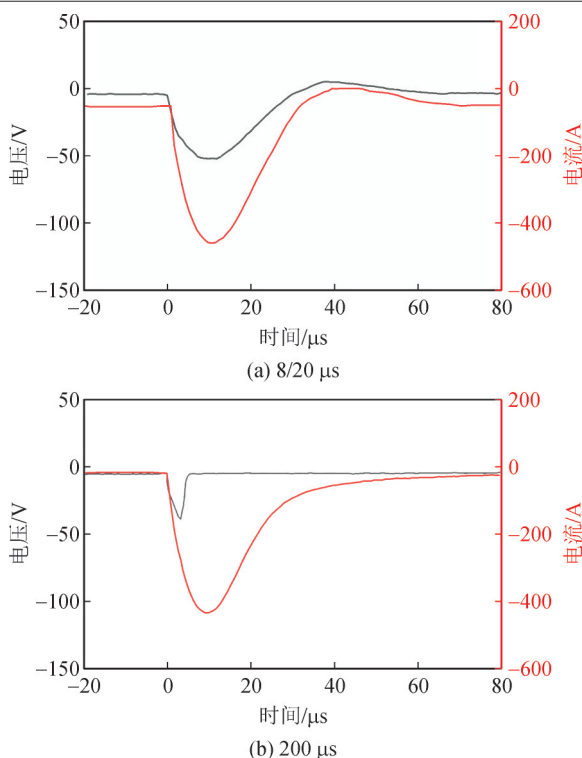


图14 线圈电压试验波形

Fig. 14 Test waveforms of the coil voltage

主回路通过相同幅值的8/20、200 μs冲击电流时,二次线圈感应的电压幅值均不同。200 μs正弦波冲击电流感应的电压幅值小于8/20 μs波形感应的电压幅值,相应的电容器充电电压也会较低,要驱动计数装置动作,就需要主回路通过较大的冲击电流。

通过前面2.4.3节和2.4.5节的实验可知,200 μs正弦波冲击电流至少要达到600 A,才能动作;而10 ms正弦半波冲击电流达到588 A时,计数器仍未动作。试验结果表明,试验电流的波形越长,波头越缓,监测器的动作电流越大。

进一步推论,故障电流波形更宽的时长(约6.5 ms)导致需要比规程8/20 μs测试波形更大的幅值才能触发监测器动作,且该动作电流很可能大于700 A。受试验条件限制,实验室现场无法产生近似故障电流波形来测试监测器动作效果,未来有条件还需完善该试验。

#### 4 结论

综上所述,关于提升特高压避雷器用监测器的可靠性,文中给出如下建议:

1)外挂新型放电计数监测终端,记录动作次数。现有监测器均为传统式继电器计数,需要一定的动作电流触发其动作。可将新型放电计数监测

终端并接在机械式放电计数器两端(见图15),其基于电压触发计数,不受冲击电流波形影响。此外,还可通过精密穿心式电流互感器测量泄漏电流,甚至记录避雷器动作电流波形及实现相关参数的测量和数据回传。

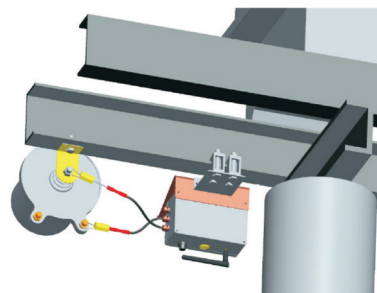


图15 现场安装示意图

Fig. 15 Site installation diagram

2)根据应用场景的重要性不同,细化相应的监测器招标技术要求。市面上监测器质量主要受招标价格限制。目前针对监测器的招标要求比较空泛,比如能计数、能远传、密封性能好等,而没有给出具体指标。由此使得厂家的重心放在降低成本、提高利润上面,产品质量没有得到足够保障。这对电力设备安全可靠运行的要求是弊大于利。

3)对避雷器监测器单独进行供应商绩效评价。在每年避雷器设备供应商绩效评价工作中,95%以上统计缺陷都是避雷器计数器和监测器缺陷,而计数器和监测器厂家并非避雷器本体制造厂。生产计数器及监测器的厂家,重点关注成本价格,而非功能和可靠性等方面。因此,可对其进行单独评价,驱动避雷器本体制造商关注监测器质量问题。

4)建议监测器向数字化转型。随着电子电路的发展,监测器记录动作次数功能,完全可由现今的电容驱动机械式计数器记录动作次数,向单片机记录动作次数进行数字化转换。数字化电路可以将相关数据通过无线功能上传,确定系统过电压的时间及避雷器动作时间,有利于协助运维人员检测、判断设备运行状态。

#### 参考文献:

[1] 吴德贯,周禹,余忠田,等.一起500 kV金属氧化物避雷器故障分析[J].电瓷避雷器,2013(3):58-60.  
WU Deguan, ZHOU Yu, YU Zhongtian, et al. A fault analysis of 500 kV metal oxide surge arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3):58-60.

[2] 司文荣,施卫峰,王昭夏,等.两起同型号复合外套金属氧化锌避雷器故障分析[J].高压电器,2017,53(10):238-245.  
SI Wenrong, SHI Weifeng, WANG Zhaoxia, et al. Fault analysis on two composite bushing MOAs with same type[J]. High Voltage

- Apparatus, 2017, 53(10):238-245.
- [3] 贺家慧,张丹丹,张露,等. 变电站工频电磁场对避雷器在线监测装置测量稳定性影响试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 117-122.  
HE Jiahui, ZHANG Dandan, ZHANG Lu, et al. Experimental study on measurement stability of online monitoring device for surge arrester under power frequency interference of electric field and magnetic field in the substations[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 117-122.
- [4] 吴传奇,李晓辉,阮玲,等. 特高压直流接地极近区新能源接入电网的直流偏磁评测与抑制[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4172-4180.  
WU Chuanqi, LI Xiaohui, RUAN Ling, et al. DC bias evaluation and suppression of power grid with renewable energy near grounding electrode of UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10):4172-4180.
- [5] 孙泉,田泽群,王富豪. 避雷器残压试验中雷电冲击残压波形影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 104-112.  
SUN Quan, TIAN Zequn, WANG Fuhao. Factors affecting lightning residual voltage waveform in surge arrester residual voltage test[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 104-112.
- [6] 钟定珠,彭向阳,李谦. 电网失去中性点接地而引起避雷器爆炸事故的分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(2): 34-36.  
ZHONG Dingzhu, PENG Xiangyang, LI Qian. Analysis on MOA failure due to de-grounding of neutral in power network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(2): 34-36.
- [7] 潘静,吴漠云. 一起氧化锌避雷器爆炸事故分析及防治措施[J]. 安徽电力职工大学学报, 2003, 8(3): 38-39.  
PAN Jing, WU Moyun. Analysis of a zinc oxide lightning arrester explosion accident and the prevention measure[J]. Journal of Anhui Electric Power College for Staff, 2003, 8(3): 38-39.
- [8] 司增彦. 一起110 kV氧化锌避雷器(MOA)事故的原因分析及对策[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 399-400.  
SI Zengyan. Analysis of an accident of 110 kV MOA arrester and precautions[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 399-400.
- [9] 齐赛,朱晓斌,马欢,等. ZnO避雷器爆炸原因分析及防范措施[J]. 大众用电, 2007, 23(12): 34-35.  
QI Sai, ZHU Xiaobin, MA Huan, et al. Analysis and protecting measure on ZnO surge arrester under bursting[J]. Popular Utilization of Electricity, 2007, 23(12): 34-35.
- [10] 王红娜. 一起氧化锌避雷器爆炸事故的分析[J]. 大众用电, 2010(3): 35-36.  
WANG Hongna. Analysis on explosion accident for ZnO arrester[J]. Popular Utilization of Electricity, 2010(3): 35-36.
- [11] 韩西坪. 一起220 kV氧化锌避雷器爆炸原因分析及防范措施[J]. 广西电业, 2011(8): 80-81.  
HAN Xiping. Cause analysis and preventive measures of 220 kV MOA explosion[J]. Guangxi Electric Power, 2011(8): 80-81.
- [12] 严玉婷,江健武,钟建灵,等. 金属氧化物避雷器事故分析及测试方法的比较研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(5): 63-69.  
YAN Yuting, JIANG Jianwu, ZHONG Jianling, et al. MOA accident analysis and comparative study of testing methods[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(5): 63-69.
- [13] 吴德贯,刘凡栋,梁华洋. 金属氧化物避雷器停电直流高压试验影响因素探讨[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 90-93.  
WU Deguan, LIU Fandong, LIANG Huayang. A discussion of influence factors in the power failure DC high voltage test of MOA[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 90-93.
- [14] 马勇,刘洋,谢天喜,等. 一起氧化锌避雷器故障原因分析与思考[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 139-144.  
MA Yong, LIU Yang, XIE Tianxi, et al. Analysis on a fault of metal oxide surge arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 139-144.
- [15] 张召涛,钟光强,李晓斌,等. 一起氧化锌避雷器爆炸事故分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 192-196.  
ZHANG Zhaotao, ZHONG Guangqiang, LI Xiaobin, et al. Analysis on an explosion accident of metal oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 192-196.
- [16] 潘浩,杜涵,马御棠,等. 一起老旧500 kV站用型避雷器故障原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 45-51.  
PAN Hao, DU Han, MA Yutang, et al. Fault analysis on MOA used in an old 500 kV station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 45-51.
- [17] 庄飞虎,马金财,何龙,等. 一起10 kV避雷器击穿与互感器烧毁故障原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 8-14.  
ZHUANG Feihu, MA Jincai, HE Long, et al. Cause analysis of a 10 kV surge arrester breakdown and transformer burnout fault[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 8-14.
- [18] 岳淦淞,李毅. 带电快速更换避雷器在线监测器的应用[J]. 大众用电, 2019(5): 28-29.  
YUE Yusan, LI Yi. Application of on-line monitor for quick replacement of lightning arrester with live charge[J]. Popular Utilization of Electricity, 2019(5): 28-29.
- [19] 王从刚. 避雷器在线监测器指示异常分析及处理[J]. 电工电气, 2017(4): 50-53.  
WANG Conggang. Abnormal indication analysis and disposal of arrester online monitor[J]. Electrotechnics Electric, 2017(4): 50-53.
- [20] 江栋,杨海涛,徐沛,等. 氧化锌避雷器用传统数轮计数型监测器下限动作灵敏度研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(4): 184-188.  
JIANG Dong, YANG Haitao, XU Pei, et al. Study on lower limit action sensitivity of conventional counting type monitor for Zinc oxide surge arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4): 184-188.
- 肖冕(1994—),男,博士,工程师,研究方向为电力系统过电压与绝缘配合、高电压试验技术等(通信作者)(E-mail: xiaomian1994@foxmail.com)。