

# 直流工程中 400 kV 交流金属氧化物避雷器 短时工频耐受能力的研究

蔡汉生<sup>1</sup>, 朱斌<sup>2</sup>, 金小明<sup>1</sup>, 何计谋<sup>2</sup>, 祝嘉喜<sup>2</sup>

(1. 南方电网技术研究中心, 广州 510623; 2. 西安电瓷研究所, 西安 710077)

## Research on Short-time Power Frequency Tolerance of 400 kV AC MOA in DC Projects

CAI Han-sheng<sup>1</sup>, ZHU Bin<sup>2</sup>, JIN Xiao-ming<sup>1</sup>, HE Ji-mou<sup>2</sup>, ZHU Jia-xi<sup>2</sup>

(1. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China; 2. Xi'an Electro-ceramic Research Institute, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Based on the requirement of arrester's power frequency tolerance, research on short-time power frequency tolerance of 400 kV MOA has been carried out in order to meet the island operation of Chuxiong converter station in Yun-Guang ±800 kV DC Project. It is proved that the arrester has ability of abiding overvoltage about 1.25  $U_r$  for 0.5 s to the high performance resistance slice. And the experiments also proved that the power frequency tolerance can be up to 1.27  $U_r$  for 2 s, and it is repeatable.

**Key words:** DC project; island operation; MOA; short-time power frequency tolerance

**摘要:** 为了满足云广直流工程楚雄换流站孤岛运行方式, 依据系统对避雷器工频耐受的要求, 对 400 kV MOA 短时工频耐受能力进行了研究。通过试验验证, 采用高性能电阻片, 避雷器具有耐受 1.25  $U_r$  过电压 0.5 s 的能力。同时证明了避雷器的工频耐受能力有较大的裕度, 避雷器具有耐受 1.27  $U_r$  过电压 2 s 的能力, 并且具有重复性。

**关键词:** 直流工程; 孤岛运行方式; 金属氧化物避雷器; 短时工频耐受

云广 ±800 kV 直流工程楚雄换流站孤岛运行方式下, 由于换流站装有大量的无功补偿, 当发生直流双极闭锁故障时, 若不采取措施, 会在交流系统产生很高的工频过电压, 危及设备安全。在楚雄换流站及送端系统中, 氧化锌避雷器的工频耐受能力是最弱的, 尤其楚雄换流站交流侧保护用的氧化

锌避雷器。该换流站交流侧保护选用 400 kV 交流无间隙金属氧化物避雷器, 其额定电压为 400 kV, 最大持续运行电压为 318 kV, 30/60  $\mu$ s 操作冲击电流下的残压保护水平为 2.0 kA 下不大于 798 kV, 8/20  $\mu$ s 雷电冲击电流下的残压保护水平为 20 kA 下不大于 980 kV, 最大吸收能量为 4.5 MJ。

为了确认云广 ±800 kV 直流工程中使用避雷器的工频耐受能力能够满足该工程孤岛运行方式下的工频过电压要求, 本文进行了楚雄换流站 400 kV MOA 短时工频耐受能力试验研究。

### 1 楚雄换流站 400 kV MOA 短时工频耐受能力试验方案

#### 1.1 避雷器的工频耐受能力要求

根据工频过电压计算结果、楚雄换流站避雷器选择方案和可供选用的避雷器的工频耐受曲线, 初步确定避雷器的工频耐受能力应满足表 1 的要求。由于国内试验设备电源容量限制, 施加的工频耐受电压最高为避雷器额定电压的 1.25 倍。

表 1 避雷器的工频耐受能力

Tab.1 Arrester Power Frequency Tolerance Ability		
过电压倍数/ $U_r$	耐受电压值(有效值)/kV	耐受时间/s
1.30	520	0.2
1.25	500	0.5
1.20	480	1
1.15	460	10
1.10	440	30
1.00	400	1 200

注: 注入能量为 2 次注入 4.5 MJ。

## 1.2 避雷器工频耐受试验比例单元

按照 IEC 60099-4 要求, 进行避雷器和避雷器热比例单元的散热特性的研究, 并制作避雷器的热比例单元(如图 1 所示), 避雷器比例元件的额定电压大于 3 kV。避雷器元件和避雷器比例单元的散热特性曲线如图 2 所示, 热比例单元的结构和热等价性符合工频耐受试验的要求。

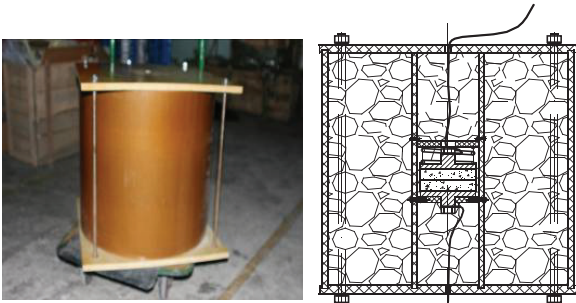


图 1 工频耐受试验用比例单元装置

Fig. 1 Frock Being Tested that with Arrester Proportion Element of Power Frequency Tolerance

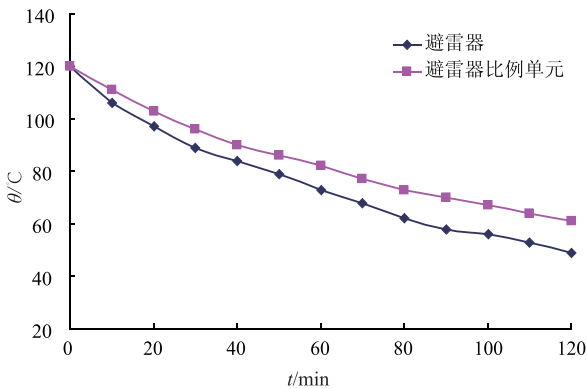


图 2 400 kV 避雷器元件和避雷器比例单元的散热特性

Fig. 2 400 kV Arrester Component and Arrester Proportion Element Heat Dissipation Characteristic Curve

## 1.3 避雷器老化试验

应用具有强大的实体造型、解算、数据分析和处理功能的有限元分析软件及工作站, 进行 400 kV 金属氧化物避雷器三维有限元计算分析, 以及电阻片的介电常数和并联电容管的电容量优化, 并确定了避雷器电压分布不均匀率的最大值为 8.37%、-11.33%。

根据避雷器的最大电位分布系数, 进行避雷器电阻片的加速老化试验, 确定加速老化系数小于 1, 按标准规定取老化系数  $K_{ct}$  为 1, 老化试验曲线如图 3 所示。

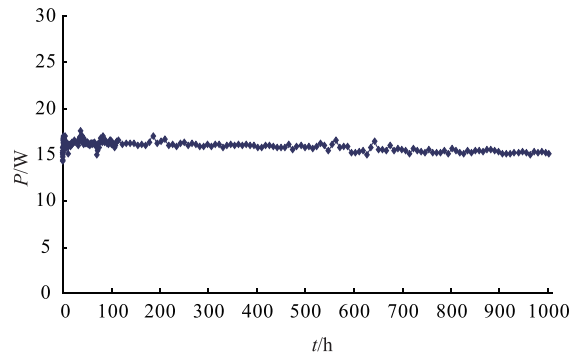


图 3 老化试验曲线

Fig. 3 Aging Test Curve

对避雷器比例元件分别施加规定的持续运行电压。根据试验结果, 绘制避雷器工频耐受曲线。

选用西瓷所新研制的高性能  $\phi 115$  mm 电阻片, 电压梯度为 250 V/mm 左右, 制作 21 个避雷器比例元件, 保证避雷器比例元件与整只避雷器具有电气等价性和热等价性, 避雷器比例元件的额定电压大于 3 kV。

在武汉高压研究院对电阻片进行工频耐受试验, 试验用回路的容量为 800 kVA, 基本可以满足工频耐受试验的容量要求。试验项目及顺序如下:

(1) 将 21 个避雷器比例单元分成 A, B, C 三组, A 组 5 个避雷器比例单元, B 组 5 个避雷器比例单元, C 组 11 个避雷器比例单元;

(2) 对 A, B 组分别施加操作能量, 按比例折算, 避雷器的吸收能量应不小于 4.5 MJ (2 次)。C 组比例元件进行能量耐受试验, 采用 5 级长持续电流试验回路进行试验, 整只避雷器参考电压为 571 kV;

(3) 对 A, B, C 三组避雷器比例元件, 施加规定的工频过电压, 再施加规定的持续运行电压, 持续时间 1 800 s。

## 2 避雷器工频耐受试验结果

### 2.1 能量吸收能力

从 A 组和 B 组长持续电流试验来看: 比例元件的能量耐受能力均达到 400 kV 避雷器的规定要求, 并且有 50% 以上的能量耐受裕度。当整只避雷器的参考电压增加时, 避雷器的能量耐受能力也相应增加, 这是因为参考电压增加, 避雷器的电阻片数量也相应增加的缘故。但是虽然避雷器的能量增加, 对避雷器的保护水平要求更加严格, 压比要求更低, 增加了避雷器的制造难度。

C 组电阻片两次长持续电流吸收的能量为 57.83~2.58 kJ, 避雷器的比例元件的比能量为 14.72~18.42 kJ/kV, 对应的整只避雷器的吸收能量为 5.89~7.37 MJ, 满足规定要求, 且有 31%~64% 裕度。

## 2.2 避雷器比例元件工频耐受试验

### 2.2.1 A 组比例元件工频耐受试验

由于加速老化试验系数小于 1.0, 施加的工频过电压和持续运行电压不需要校正, 施加的试验电压为实际折算的工频过电压和持续运行电压, A 组避雷器比例元件在长持续电流耐受试验后, 按照表 1 的规定施加工频过电压和耐受时间。具体试验数据见表 2。

表 2 A 组比例元件工频耐受试验数据

试品编号	A1	A2	A3	A4	A5
试验的电压/kV	4.07	4.48	4.68	4.88	4.95
耐受时间/s	1200	30	10	1	0.6
过电压倍数 $k_1$	1.0	1.10	1.15	1.19	1.21
过电压倍数 $k_2$	1.03	1.13	1.18	1.23	1.25
过电压倍数 $k_3$	1.04	1.14	1.19	1.239	1.259
施加持续运行电压/kV	3.56	3.56	3.56	3.58	3.57
耐受时间/min	30	30	30	30	30
电阻片表面温度/°C	57	75	95	88	112

注: 1) 第 2 次长持续电流耐受后, 在尽可能短的时间内, 不超过 100 ms, 施加工频电压。

2)  $k_1$  等于施加的电压与比例元件额定电压之比, 计算时避雷器的参考电压为 550 kV。

3)  $k_2$  等于施加的电压与比例元件额定电压之比, 计算时避雷器的参考电压为 567 kV。

4)  $k_3$  等于施加的电压与比例元件额定电压之比, 计算时避雷器的参考电压为 571 kV。

### 2.2.2 B 组比例元件工频耐受试验

B 组试品用于提高避雷器工频过电压耐受能力的试验, 只在 4.88 kV 和 4.95 kV 电压下进行验证, 通过延长耐受时间和重复性试验, 验证避雷器的极限耐受特性和耐受能力的重复性 (见表 3)。

表 3 B 组比例元件工频耐受试验数据

试品编号	B1	B2	B3	B4	B5
试验的电压/kV	4.95	4.95	4.95	4.95	4.88
耐受时间/s	2	4	2.3	2	5
过电压倍数 $k_1$	1.23	1.23	1.24	1.23	1.21
过电压倍数 $k_2$	1.27	1.27	1.28	1.27	1.25
过电压倍数 $k_3$	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26
施加持续运行电压/kV	3.43			3.43	3.44
耐受时间/min	30			30	30
电阻片表面温度/°C	107		165	124	147

注: 1) 第 2 次长持续电流耐受后, 在尽可能短的时间内, 不超过 100 ms, 施加工频电压。

2)  $k_1$  等于施加的电压与比例元件额定电压之比, 计算时避雷器的参考电压为 550 kV。

3)  $k_2$  等于施加的电压与比例元件额定电压之比, 计算时避雷器的参考电压为 567 kV。

4)  $k_3$  等于施加的电压与比例元件额定电压之比, 计算时避雷器的参考电压为 571 kV。

从 A、B 两组比例元件工频耐受试验结果来看, 当整只避雷器参考电压大于 567 kV 时, 避雷器具有耐受  $1.25 U_r$ , 0.5 s 的工频过电压的能力, 还具有一定的耐受工频过电压的裕度。由表 3 可见, 避雷器具有耐受  $1.27 U_r$ , 2 s 的工频过电压的能力和  $1.25 U_r$ , 5 s 的工频过电压的能力, 并且试验具有一定的重复性。

### 2.2.3 C 组比例元件工频耐受试验

C 组试品是在 A、B 两组试品试验的基础上, 用于进一步提高避雷器工频过电压耐受能力的试验。在进行 C 组试品试验时, 整只避雷器参考电压选择大于 567 kV, 避雷器的工频过电压倍数为 1.25 倍, 耐受时间为 2~5 s, 验证避雷器的极限耐受特性和耐受能力的重复性 (见表 4)。

从表 4 可知, 当整只避雷器参考大于 567 kV 时, 避雷器耐受  $1.25 U_r$ , 2 s, 2 片电阻片均通过了试验; 避雷器耐受  $1.25 U_r$ , 3 s, 3 片电阻片均通过了试验; 避雷器耐受  $1.25 U_r$ , 4 s, 2 片电阻片通过了试验; 1 片电阻片未通过试验; 避雷器耐受  $1.25 U_r$ , 5 s, 1 片电阻片均通过了试验, 2 片电阻片未通过试验。说明在此条件下, 避雷器的极限耐受能力为  $1.25 U_r$ , 4 s, 远远高于表 1 要求的  $1.25 U_r$ , 0.5 s 的工频过电压耐受能力的要求, 裕度很大。

表 4 C 组比例元件工频耐受试验数据

试品编号	试验的电压/kV	耐受时间/s	过电压倍数	施加持续电压/kV	耐受时间/min
C1	4.95	2	1.25	3.15	30
C2	4.95	2	1.25	3.15	30
C3	4.95	3	1.25	3.15	30
C4	4.95	3	1.25	3.15	30
C5	4.99	3	1.25	3.17	30
C6	4.95	3.88 s 后击穿			
C7	4.91	4	1.25	3.12	30
C8	4.91	4	1.25	3.12	30
C9	4.94	5	1.25	3.14	30
C10	4.93	4.68 s 后击穿			
C11	4.96	5	1.25	3.16	2 s 后击穿

注: 1) 第 2 次长持续电流耐受后, 在尽可能短的时间内, 不超过 100 ms, 施加工频电压。

2) C5, C7, C8, C9 的电阻片表面温度分别为 90°C, 88°C, 99°C 和 98°C。

### 2.3 工频耐受试验曲线

根据表 2 中的试验数据, 可以绘制 400 kV 避雷器工频耐受试验曲线, 即在注入一定能量后, 400 kV 避雷器工频耐受过电压倍数与耐受时间的曲线 (如图 4 所示)。

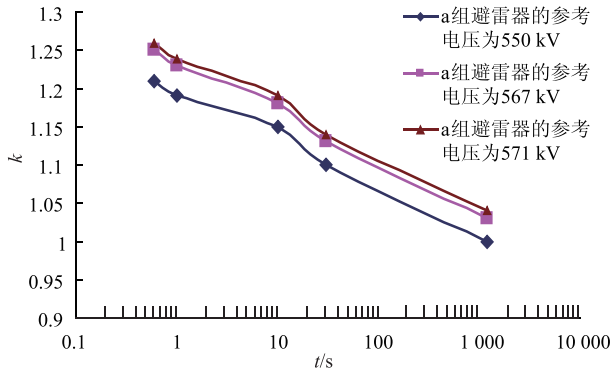


图 4 400 kV 避雷器工频耐受试验曲线

Fig. 4 400 kV Arrester Power Frequency Tolerance Test Curve

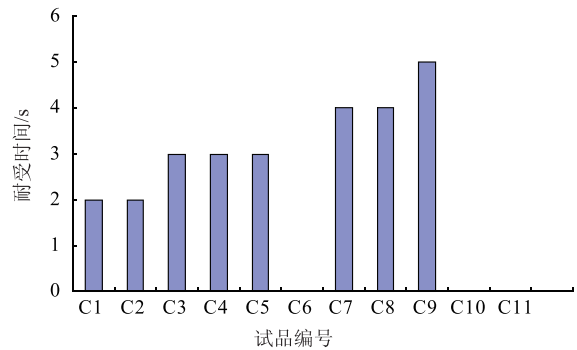
从图 4 可以看出: 工频耐受曲线较为理想, 避雷器工频耐受过电压倍数与整只避雷器的直流参考电压有关, 随着整只避雷器的直流参考电压的升高, 避雷器的工频耐受过电压倍数也增大, 当整只避雷器的直流参考电压大于 567 kV 时, 避雷器的工频耐受过电压倍数可以满足楚雄换流站的  $1.25 U_r$ , 0.6 s 的要求。当整只避雷器的直流参考电压为 571 kV 时, 避雷器的工频耐受过电压倍数可达  $1.259 U_r$ 。所以适当提高避雷器的直流参考电压, 可以提高避雷器的工频耐受能力。

### 3.4 400 kV 避雷器工频最大耐受能力曲线

根据表 4 的试验数据, 可以绘制 400 kV 避雷器 1.25 倍工频最大耐受能力曲线, 即在注入一定能量后, 400 kV 避雷器在一定的工频耐受过电压倍数下, 提高耐受时间得到的曲线 (见图 5)。

由图 5 可以看出: 当避雷器的直流参考电压大于 571 kV 时, 避雷器在  $1.25 U_r$  过电压下, 2 片电阻片均通过了耐受 2 s 试验; 3 片电阻片均通过了耐受 3 s 试验; 2 片电阻片通过了耐受 4 s 试验, 1 片电阻片未通过耐受 4 s 试验; 1 片电阻片均通过了耐受 5 s 试验, 2 片电阻片未通过耐受 5 s 试验。

由此可见, 在此条件下避雷器的极限耐受能力为  $1.25 U_r$ , 4 s, 远远高于表 1 要求的  $1.25 U_r$ , 0.5 s 的工频耐受过电压耐受能力的要求, 裕度很大, 足以满足工程要求。



注: C6、C10、C11 电阻片未通过试验。

图 5 400 kV 避雷器工频耐受的能力曲线

Fig. 5 400 kV Arrester Power Frequency Tolerance Test Curve

## 3 结论

(1) 依据系统对避雷器工频耐受的要求, 提出了 400 kV 避雷器工频耐受试验方案, 进行了工频耐受试验。通过试验验证, 采用高性能电阻片, 避雷器具有耐受  $1.25 U_r$  过电压 0.5 s 的能力, 可以满足系统工频过电压要求。

(2) 通过对避雷器最大工频耐受能力的试验验证, 证明避雷器的工频耐受能力有较大的裕度, 避雷器具有耐受  $1.27 U_r$  过电压 2 s 的能力, 并且具有重复性。

(3) 在保证避雷器保护特性的前提下, 提高避雷器的直流参考电压, 可以提高避雷器的工频耐受能力, 同时也提高了避雷器的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 南方电网技术研究中心. 云广直流孤岛运行时直流闭锁对换流站交流系统电压影响研究[R]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2006.
- [2] CIGRE-33-05 工作组. 高压直流换流站绝缘配合和避雷器使用导则[S].
- [3] DL/T605—1996, 高压直流换流站绝缘配合导则[S].
- [4] DL/T804—2002, 交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则[S].
- [5] GB11032—2000, 交流无间隙金属氧化物避雷器[S].

收稿日期: 2008-03-21

### 作者简介:

蔡汉生(1963 -), 男, 高级工程师, 工学硕士, 从事电力系统过电压及绝缘配合工作。

朱斌(1965 -), 男, 高级工程师, 工学硕士, 从事金属氧化物避雷器研究和试验工作。

金小明(1963 -), 男, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统规划、电力系统分析和直流输电。

(本文责任编辑 张亚拉)