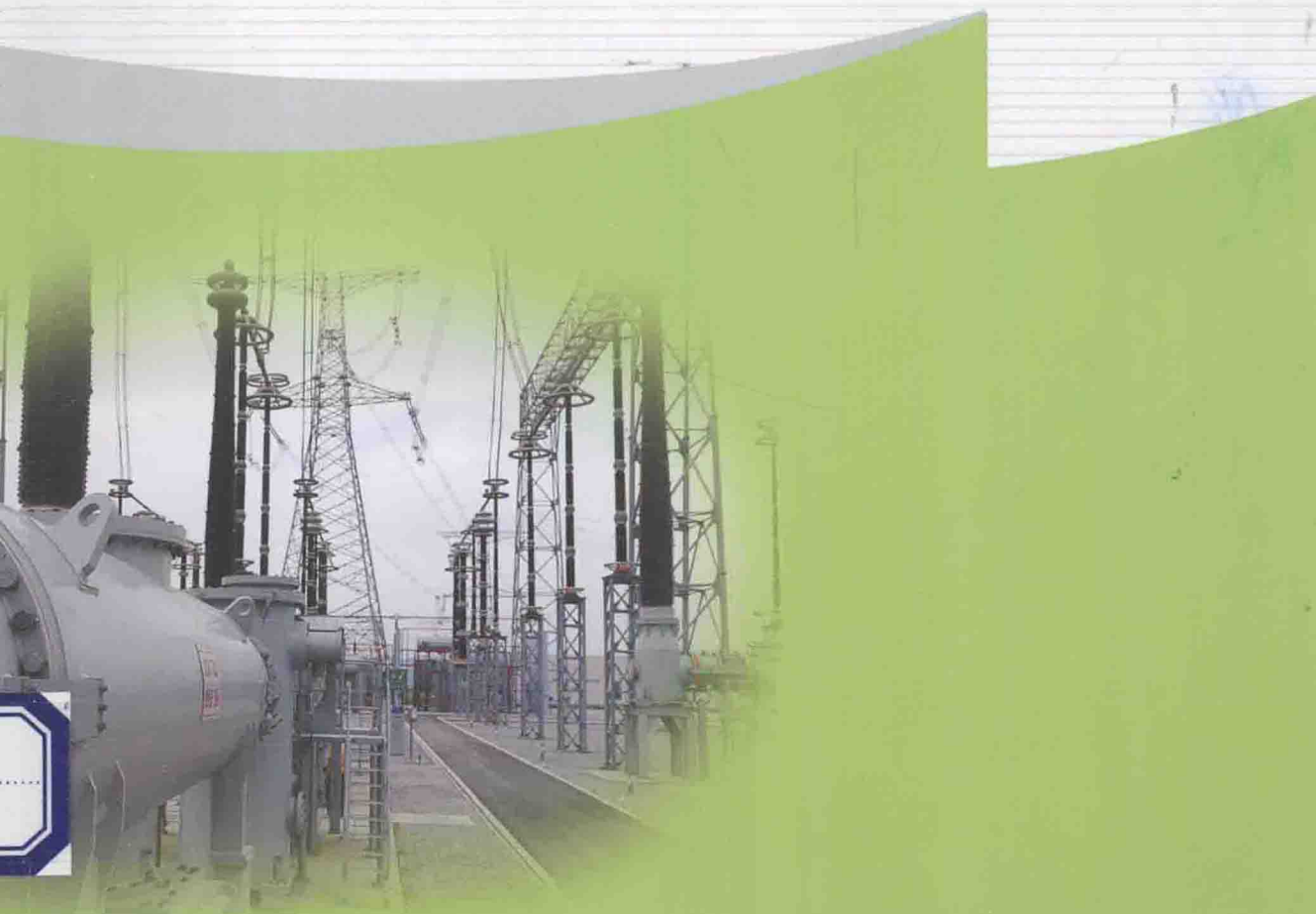


# 过电压保护与 接地装置运行维护

李 谦 肖磊石 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 过电压保护与 接地装置运行维护

李 谦 肖磊石 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

过电压保护与接地装置是维护电力系统安全可靠运行、保障人员安全的重要设备,其运行状况对电网的安全稳定运行意义重大。我国电力系统的快速发展,电网规模和系统容量不断扩大,对过电压保护与接地装置的运行维护水平提出了越来越高的要求,本书顺应这一形势,结合过电压保护与接地装置运行实际,主要涉及变电站避雷器、线路避雷器、电压互感器二次绕组中性点过电压保护、变压器中性点过电压保护,以及变电站接地装置等过电压保护与接地装置的运行维护问题。

本书是广东电网的过电压保护与接地装置运行维护经验的总结,共分8章,结合有代表性的案例分析,分别论述变电站金属氧化物避雷器在运行维护和缺陷分析方面应注意的问题;论述了线路避雷器的防雷有效性,提出运行维护的策略;论证了电压互感器二次回路中性点就地安装过电压保护的必要性,提出避雷器的参数和选型原则;通过对变压器中性点保护运行异常情况的分析,提出变压器中性点过电压保护的配置原则;针对接地网隐蔽工程和免维护的特点,将接地网安全性评估引入接地装置运行维护中,着重介绍了接地网腐蚀诊断技术及其应用。

本书主要面向电力行业基层专业技术人员,可作为过电压和接地专业技术人员运行维护的参考书,也可供过电压和接地专业科研和设计参考,还可作为高等院校电气类专业的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

过电压保护与接地装置运行维护/李谦,肖磊石编著. —北京:中国电力出版社,2014.10

ISBN 978-7-5123-6269-7

I. ①过… II. ①李…②肖… III. ①过电压保护②接地装置 IV. ①TM86②TM774

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第173695号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2014年10月第一版 2014年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 22.625印张 557千字

印数0001—3000册 定价68.00元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



## 前言

## Preface

过电压和防雷接地专业是保障电力系统发电厂、变电站的人身和电气设备免受过电压危害的一个重要专业,涉及过电压与绝缘配合、防雷和接地等方面的技术,需要合理地解决过电压与绝缘配合问题。

发电厂和变电站(包括换流站、串补站等),以及线路过电压保护与接地装置是维护电力系统安全可靠运行、保障人员安全的重要设备,是电力设备的重要组成部分,其运行状况对电网的安全稳定运行意义重大。

随着我国电力系统的快速发展,一方面,电网规模不断扩大,电压等级不断提高,系统容量和接地短路电流水平越来越高;另一方面,我国电网向数字化、自动化和智能化大踏步迈进,带来电磁兼容问题越来越突出,新设备新技术层出不穷,给如何提高过电压保护与接地装置的运行及维护水平,保障电力设备和系统的安全稳定运行,提出了新课题。

本书结合变电站过电压保护与接地装置运行实际,总结了广东电网的运行维护经验,结合有代表性的案例分析,从运行和维护的角度论述变电站金属氧化物避雷器全生命周期管理中的验收、试验和维护环节应注意的问题,介绍了避雷器缺陷分析方面的经验;对线路避雷器在输电线路防雷方面的有效性进行试验分析,介绍了线路避雷器的异常运行情况和对策,提出运行维护的策略;论证了电压互感器二次回路中性点就地安装过电压保护的必要性,提出选择性能优良的低压无间隙金属氧化物避雷器替代放电间隙的思路及实现方式,给出了避雷器的参数和选型原则;对不接地运行的变压器中性点过电压保护运行异常情况和存在的问题进行分析,提出变压器中性点过电压保护的配置原则,对变压器中性点保护进行规范;针对接地网隐蔽工程和免维护的特点,提出了接地装置运行维护在状态检测、状态评估和状态检修方面的新技术和管理理念,将接地网安全性评估模式引入接地装置的预防性试验中,顺应了电力设备状态检测和状态检修的形势要求。本书的内容尽量参考和引用国内外的规程、规范和最新研究成果。

本书第1~第6章由广东电网公司电力科学研究院教授级高级工程师李谦编写,第7章和第8章由广东电网公司电力科学研究院工程师肖磊编写。

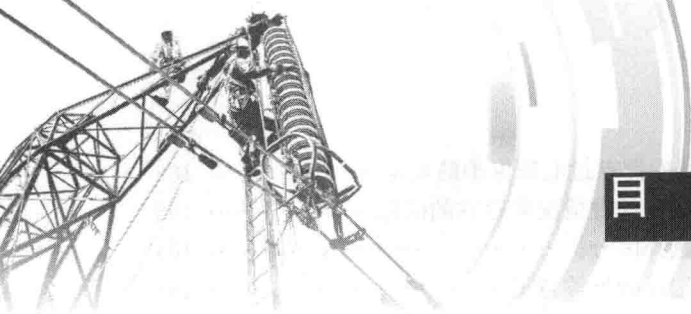
钟定珠、彭向阳、饶章权、陈晓国、周原、李一泉等对本书的编写给予了大力帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

本书是广东电网公司电力科学研究院近年来开展过电压保护和接地网状态评估工作的总结,期间得到了南方电网公司、广东电网公司的科技项目资金资助。本书编写参考和引用了清华大学、武汉大学、重庆大学和佛山供电局等单位的大量相关论文、书籍和技术报告,并列入参考文献中,在此深表谢意。另外,还有很多同行为本书的编写提供了资料和意见,在此一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平所限,难免有不足之处,恳请读者多提宝贵建议。

编著者

2014年2月



# 目 录

# Contents

## 前言

|              |                                         |     |
|--------------|-----------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章</b> | <b>无间隙金属氧化物避雷器的运行维护</b>                 | 1   |
| 1.1          | 避雷器的作用                                  | 1   |
| 1.2          | 金属氧化物避雷器的全生命周期管理                        | 5   |
| 1.3          | 金属氧化物避雷器的直流预防性试验                        | 20  |
| 1.4          | 金属氧化物避雷器的交流带电测试                         | 30  |
| 1.5          | 本章小结                                    | 36  |
| <b>第 2 章</b> | <b>无间隙金属氧化物避雷器的异常和缺陷分析</b>              | 38  |
| 2.1          | 外绝缘表面污秽引起的带电测试和红外检测异常现象                 | 38  |
| 2.2          | 红外检测在运行避雷器缺陷检测中的应用                      | 46  |
| 2.3          | 缺陷避雷器的分析方法                              | 50  |
| 2.4          | 线路终端避雷器的运行维护                            | 57  |
| 2.5          | 中压系统过电压保护器的运行维护                         | 61  |
| 2.6          | 避雷器吸收能量分析在避雷器故障分析中的应用                   | 66  |
| 2.7          | 广东地区无间隙金属氧化物避雷器典型故障和缺陷分析                | 73  |
| 2.8          | 本章小结                                    | 75  |
| <b>第 3 章</b> | <b>110kV 及以上线路避雷器对输电线路防雷保护有效性及其运行维护</b> | 77  |
| 3.1          | 线路避雷器在输电线路防雷中的作用                        | 77  |
| 3.2          | 广东地区线路避雷器的安装和运行情况                       | 78  |
| 3.3          | 广东地区线路避雷器运行异常情况及分析                      | 86  |
| 3.4          | 线路避雷器对线路绝缘子配合的有效性                       | 93  |
| 3.5          | 线路避雷器选点和安装的若干问题                         | 103 |
| 3.6          | 线路避雷器的运行维护                              | 108 |
| 3.7          | 本章小结                                    | 122 |
| <b>第 4 章</b> | <b>电压互感器二次绕组中性点过电压保护</b>                | 124 |
| 4.1          | 电压互感器二次绕组存在的问题                          | 124 |
| 4.2          | 电压互感器二次回路中性点未加保护措施时雷电冲击传递过电压            | 128 |
| 4.3          | 电压互感器二次绕组中性点氧化锌避雷器的选型                   | 140 |
| 4.4          | 电压互感器二次回路中性点加装避雷器后的雷电冲击传递过电压            | 143 |
| 4.5          | 电压互感器二次侧中性点雷电冲击传递过电压及避雷器保护性能分析          | 146 |
| 4.6          | 本章小结                                    | 157 |
| <b>第 5 章</b> | <b>110kV 和 220kV 变压器中性点过电压保护</b>        | 159 |
| 5.1          | 变压器中性点绝缘                                | 159 |
| 5.2          | 运行中不接地变压器中性点可能承受的各种过电压水平                | 160 |

|                   |                                          |            |
|-------------------|------------------------------------------|------------|
| 5.3               | 有关过电压和继电保护规程对变压器中性点过电压保护的规定 .....        | 163        |
| 5.4               | 110kV 和 220kV 变压器中性点保护运行异常情况和存在的问题 ..... | 166        |
| 5.5               | 110kV 和 220kV 变压器中性点保护选择的分析 .....        | 184        |
| 5.6               | 110kV 和 220kV 变压器中性点保护选择的推荐意见 .....      | 191        |
| 5.7               | 本章小结 .....                               | 194        |
| <b>第 6 章</b>      | <b>发电厂和变电站接地装置的运行维护 .....</b>            | <b>196</b> |
| 6.1               | 接地装置及其作用 .....                           | 196        |
| 6.2               | 接地装置运行维护的总体要求 .....                      | 201        |
| 6.3               | 接地装置的全生命周期管理存在的问题 .....                  | 203        |
| 6.4               | 变电站防雷接地装置的技术管理 .....                     | 206        |
| 6.5               | 接地网的设计 .....                             | 208        |
| 6.6               | 接地装置的验收 .....                            | 214        |
| 6.7               | 接地装置的巡视 .....                            | 224        |
| 6.8               | 接地装置的检测和状态评价 .....                       | 225        |
| 6.9               | 接地装置的维修 .....                            | 243        |
| 6.10              | 本章小结 .....                               | 246        |
| <b>第 7 章</b>      | <b>接地网腐蚀状况的诊断 .....</b>                  | <b>248</b> |
| 7.1               | 接地网的腐蚀特性和腐蚀行为 .....                      | 248        |
| 7.2               | 接地网腐蚀故障诊断的背景 .....                       | 264        |
| 7.3               | 基于电气特性的接地网腐蚀诊断技术 .....                   | 269        |
| 7.4               | 基于理化特性的接地网腐蚀诊断技术 .....                   | 301        |
| 7.5               | 本章小结 .....                               | 306        |
| <b>第 8 章</b>      | <b>接地网腐蚀诊断平台及腐蚀诊断技术的现场应用 .....</b>       | <b>307</b> |
| 8.1               | 接地网腐蚀诊断平台 .....                          | 307        |
| 8.2               | 接地网腐蚀诊断技术的现场应用 .....                     | 314        |
| 8.3               | 本章小结 .....                               | 353        |
| <b>参考文献 .....</b> |                                          | <b>355</b> |



# 第 1 章 无间隙金属氧化物避雷器的运行维护

## 1.1 避雷器的作用

### 1.1.1 避雷器的基本功能和分类

避雷器是保证电力系统安全可靠运行、保障人员安全的重要措施之一，作为过电压保护器，在输变电设备遭受雷击或系统发生过电压故障时起到快速泄放雷电流或工频短路电流，从而限制设备过电压的作用，其设备本身运行状况的好坏及运行维护和检测工作对输变电设备安全稳定运行意义重大。

避雷针和避雷线虽然可防止雷电对电气设备的直击，但被保护的电气设备仍然有被雷击过电压损坏的可能。当雷击线路和雷击线路附近的大地时，将在输电线路上产生过电压，这种过电压以波的形式沿线路传入发电厂和变电站，危及电气设备的绝缘。为了限制侵入波过电压的幅值，基本的过电压保护装置就是避雷器。

避雷器实质上是一种限压器，并联在被保护设备附近，当线路上传来的过电压超过避雷器的放电电压时，避雷器先行放电，把过电压波中的电荷引入地中，限制了过电压的发展，从而保护了其他电气设备免遭过电压而发生绝缘损坏。

为了达到预想的保护效果，避雷器必须满足以下基本要求：

(1) 具有良好的伏秒特性。避雷器与被保护设备之间应有合理的伏秒特性配合，要求避雷器的伏秒特性比较平坦、分散性小，避雷器伏秒特性的上限应不高于被保护设备伏秒特性的下限。工程上常用冲击系数来反映伏秒特性的形状。冲击系数是指冲击放电电压与工频放电电压之比，其比值越小，则伏秒特性越平缓。因此，避雷器的冲击系数越小，保护性能越好。

(2) 具有较强的绝缘自恢复能力。避雷器一旦在冲击电压作用下放电，就会导致电压的突变。当冲击电压的作用结束后，工频电压继续作用在避雷器上，在避雷器中继续通过工频短路电流（称为工频续流），它以电弧放电的形式出现。当工频短路电流第一次过零时，避雷器应具有能自行截断工频续流、恢复绝缘强度的能力，使电力系统能继续正常运行。

按其发展历史和保护性能的改进过程，避雷器可分为保护间隙、管型避雷器、普通阀型避雷器、磁吹阀型避雷器和金属氧化物避雷器等类型。

除特别说明，本书涉及的避雷器专指电站用 110kV 及以上无间隙金属氧化物避雷器。

### 1.1.2 保护间隙与管型避雷器

保护间隙是最简单的一种避雷器。典型有 10kV 中压电网常用的由两个间隙组成的角型保护间隙。为可靠保护被保护设备，间隙的伏秒特性的上限应低于被保护设备绝缘的冲击放

电伏秒特性的下限,并有一定的安全裕度。当雷电波侵入时,间隙先击穿,避免了被保护设备上的电压升高。过电压消失后,间隙中仍有工频续流。保护间隙中的电极做成角形,是为了使工频电弧在自身电动力和热气流作用下易于上升被拉长而自行熄灭。由于保护间隙的灭弧能力很差,只能熄灭中性不接地系统不大的单相接地短路电流,一般难以使相间短路电弧熄灭,需要配以自动重合闸装置才能保证安全供电。

管型避雷器实际上是一种具有较高熄弧能力的保护间隙,其灭弧能力与工频续流的大小有关,续流太大产气过多,管内气压太高将使管子炸裂;续流太小产气过少,管内气压太低不足以灭弧,因此管型避雷器所能熄灭的续流有一定的上下限。与保护间隙相比,管型避雷器仅在灭弧能力上有所改进,其他缺点与保护间隙完全相同。此外,运行维护也比较麻烦。

### 1.1.3 普通阀型避雷器

由于伏秒特性难以配合和动作后出现大幅值截波等缺点,保护间隙和管型避雷器不能有效地保护变电站设备(尤其是变压器),阀型避雷器的出现,成为变电站防雷和过电压保护的更优选择,在电力系统过电压防护和绝缘配合技术的发展过程中起着重要的作用。

阀型避雷器分为普通阀型避雷器和磁吹阀型避雷器两种,后者通常简称磁吹避雷器。

阀型避雷器主要由安置在密封良好的瓷套中的火花间隙和非线性电阻(主要为SiC电阻片)两大部分串联而成。当母线上出现过电压且其幅值超过间隙放电电压时,间隙击穿,冲击电流通过电阻片流入大地。由于电阻片的非线性特性,在电阻片上产生的压降(称为残压)将受到限制,使其低于被保护设备的冲击耐压,设备得到了保护。非线性电阻的作用则是用来限制工频续流,当过电压消失后,间隙中由于工作电压产生的工频电弧电流(称为工频续流)仍将继续流过避雷器,但受电阻片的非线性特性作用,此电流远较冲击电流小,从而能在工频续流第一次过零时就将电弧切断。以后,依靠间隙的绝缘强度就能够承受电网恢复电压的作用而不会发生重燃,这样,避雷器从间隙击穿到工频续流的切断不超过半个工频周期,继电保护还来不及动作系统就已恢复正常。

普通阀型避雷器依靠间隙的自然熄弧能力熄弧,故其灭弧性能不是很强;另外,电阻片的通流能力有限,因而普通阀型避雷器只适用于雷电过电压防护,而不适用于作持续时间较长的内部过电压保护。

### 1.1.4 磁吹阀型避雷器

为了减小阀型避雷器的切断比和保护比,改进阀型避雷器的保护性能,在普通阀型避雷器的基础上,发展了新的带磁吹间隙的阀型避雷器,简称磁吹避雷器,它的基本结构和工作原理与普通阀型避雷器相似,主要区别在于采用了灭弧能力较强的磁吹火花间隙和通流能力较大的高温电阻片。

磁吹火花间隙是利用磁场对电弧的电动力,迫使间隙中的电弧加快运动、旋转或拉长,使弧柱中去电离作用增强,从而大大提高其灭弧能力。由于磁吹间隙能切断的工频续流很大,所以磁吹避雷器采用通流能力较大的电阻片电阻。

### 1.1.5 金属氧化物避雷器

#### 1.1.5.1 金属氧化物避雷器的结构特点

金属氧化物避雷器(metal oxide arrester,或简称MOA)主要是指通常所说的氧化锌

(ZnO) 避雷器, 由非线性金属氧化物电阻片串联和 (或) 并联组成且无并联或串联放电间隙的避雷器。ZnO 避雷器是 20 世纪 70 年代初开始出现的一种新型避雷器。ZnO 避雷器是由 ZnO 非线性电阻片组成的。由于 ZnO 电阻片具有优异的非线性伏安特性, 可以取消串联火花间隙, 实现避雷器无间隙无续流, 且造价低廉, 因此 ZnO 避雷器已得到越来越广泛的应用, 取代 SiC 避雷器是大势所趋。

ZnO 电阻片是 ZnO 避雷器的主要工作部件, 由于其具有非线性伏安特性, 在过电压时呈低电阻, 从而限制避雷器端子间的电压, 而在正常工频电压下呈现高电阻。ZnO 电阻片是在以 ZnO 为主要材料的基础上, 附以微量的其他金属氧化物, 在高温下烧结而成的, 也称为金属氧化物电阻片, 以此制成的避雷器也称为金属氧化物避雷器 (MOA)。

ZnO 电阻片的微观结构如图 1-1 所示。其结晶相包括三部分:

- (1) ZnO 晶粒, 粒径为  $10\mu\text{m}$  左右, 电阻率为  $1\sim 10\Omega\cdot\text{cm}$ 。
- (2) 包围着 ZnO 晶粒的  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  晶界层, 厚度为  $0.1\mu\text{m}$  左右, 电阻率大于  $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 。
- (3) 零散分布于晶界层中的尖晶石  $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$ 。

ZnO 电阻片的非线性特性主要取决于晶界层, 在低电场下其电阻率很高; 当层间电位梯度达到  $10^4\sim 10^5\text{V}/\text{cm}$  时, 其电阻率急剧下降到低阻状态。晶界层的介电常数约为  $1000\sim 2000$ , 因此 ZnO 电阻片存在较大的固有电容。ZnO 电阻片的等效电路如图 1-2 所示。

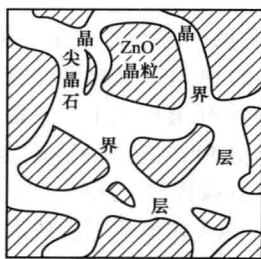


图 1-1 ZnO 电阻片的微观结构图

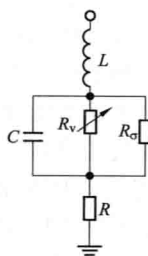


图 1-2 ZnO 电阻片的等效电路

$L$ —回路固有电感;  $C$ —晶界层固有电容;  
 $R_v$ —晶界层电阻;  $R_o$ —泄漏电阻;  
 $R$ —ZnO 本体电阻

ZnO 电阻片与 SiC 电阻片的伏安特性如图 1-3 所示, 前者的非线性明显优于后者。ZnO 电阻片在  $10^{-3}\sim 10^4\text{A}$  的范围内呈现出良好的非线性, 电阻片电阻随流过的电流大小呈非线性变化, 用式 (1-1) 表示, 其中  $C$  为与电阻片材料和尺寸有关的常数;  $\alpha$  为非线性系数, 与电阻片材料有关,  $\alpha$  越小, 说明避雷器的非线性程度越高, 残压越低, 保护性能越好。

$$U = CI^\alpha \quad (1-1)$$

ZnO 电阻片的伏安特性可分为三个典型区域, 区域 I 为低电场区, 电流密度与电场强度的开方成正比, 非线性系数  $\alpha$  为  $0.1\sim 0.2$ ; 区域 II 为中电场区, 晶界层电阻  $R_v$  减小, 非线性系数  $\alpha$  大为下降, 为  $0.01\sim 0.04$ ; 区域 III 为高场强区, ZnO 本体电阻  $R$  起主要作用, 电流与电压成正比, 伏安特性曲线向上翘。相比之下, 普通阀型避雷器的  $\alpha$  一般在  $0.2$  左右。

#### 1.1.5.2 金属氧化物避雷器的优点

与普通阀型避雷器相比, ZnO 避雷器具有优越的保护性能。

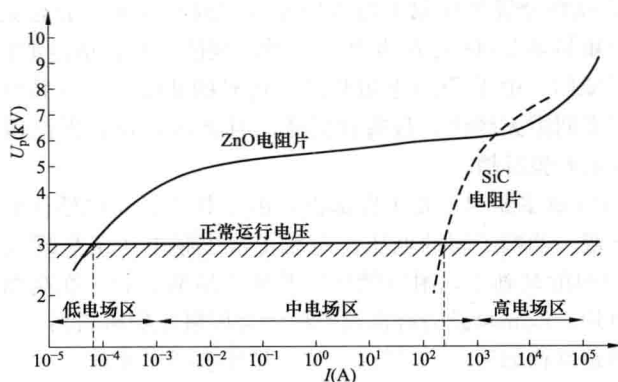


图 1-3 ZnO 电阻片和 SiC 电阻片的伏安特性

(1) 无间隙。在正常工作电压下, ZnO 电阻片呈现高阻状态, 工作电压不会使 ZnO 电阻片烧坏, 可以不用串联火花间隙。由于实现了无间隙, 其结构简单, 体积缩小, 较 SiC 同类产品重量轻, 避免了 SiC 避雷器由于瓷套外污秽、内部气压变化等因素而使串联火花间隙电压分布不均、放电电压不稳的缺点。同时, 无间隙结构也大大改善了陡波响应特性, 不存在间隙放电电压随雷电波陡度增大而增大的问题, 提高了保护的可靠性, 特别适合于伏秒特性平坦的 SF<sub>6</sub> 组合电器和气体绝缘变电站 (GIS) 的保护。

(2) 无续流。当电网中出现过电压时, 通过避雷器的电流增大, ZnO 电阻片上的残压受其良好的非线性特性控制; 当过电压作用结束后, ZnO 电阻片又恢复绝缘体状态, 续流仅为微安级, 实际上可认为无续流。所以在雷电或内部过电压作用下, 只需吸收过电压的能量, 而不需吸收续流能量, 因而动作负载轻; 再加上 ZnO 电阻片的通流容量远大于 SiC 电阻片, 所以 ZnO 避雷器具有耐受多重雷击和重复发生的操作过电压的能力。

(3) 电气设备所受过电压能量可以降低。虽然在 10kA 雷电流下的残压值 ZnO 避雷器与 SiC 避雷器相同, 但由于后者只在串联火花间隙放电后才有电流流过, 而前者在整个过电压过程中都有电流流过, 因此降低了作用在变电站电气设备上的过电压幅值。例如, 某 500kV 变电站的计算结果是: 当雷电流是 150kA (2/70 $\mu$ s) 时, 过电压下降 6%~13%; 当雷电流是 100kA 时, 过电压下降 6%~11%; 如雷电流波头取为 0.8 $\mu$ s, 过电压可下降 13%~20%。

(4) 通流容量大。ZnO 避雷器的通流能力, 完全不受串联间隙被灼伤的制约, 仅与电阻片本身的通流能力有关。实测表明: ZnO 电阻片单位面积的通流能力要比 SiC 电阻片大 4~4.5 倍, 因而可用来对内部过电压进行保护。还可很容易地采用多电阻片柱并联的办法进一步增大通流容量, 制造出用于特殊保护对象的重载避雷器, 解决长电缆系统、大容量电容器组等的保护问题。

(5) 易于制成直流避雷器。因为直流续流不像工频续流一样存在自然零点, 所以直流避雷器如用串联间隙就难以灭弧。ZnO 避雷器没有串联间隙, 所以易于制成直流避雷器。

#### 1.1.5.3 金属氧化物避雷器的电气特性

相比带串联间隙的普通阀型避雷器, 由于 ZnO 避雷器没有串联火花间隙, 也就没有灭弧电压、冲击放电电压等特性参数, 但也有某些独特的电气特性。

(1) 额定电压 ( $U_r$ )。指施加到避雷器端子间的最大允许工频电压有效值, 按照此电压所设计的避雷器, 能在所规定的动作负载试验中确定的暂时过电压下正确地工作。它是表明

避雷器运行特性的一个重要参数,但它不等于系统标称电压。

(2) 持续运行电压 ( $U_c$ )。指允许持久地施加在避雷器端子间的工频电压有效值。

(3) 起始动作电压 (又称为参考电压或转折电压)。大致位于 ZnO 电阻片伏安特性曲线由小电流区上升部分进入大电流区平坦部分的转折处,可认为避雷器此时开始进入动作状态以限制过电压。通常以参考电压来定义,其中又分为工频参考电压 ( $U_{a.c.ref}$ ) 和直流参考电压 ( $U_{d.c.ref}$ ),即以通过 1mA 工频阻性电流分量峰值或直流电流时的电压  $U_{1mA}$  作为起始动作电压。

(4) 0.75 直流参考电压下的漏电流。在 0.75 直流参考电压下流过避雷器的漏电流,这是衡量避雷器状况是否满足运行要求的重要指标,我国相关规程要求不大于  $50\mu A$ 。

(5) 避雷器的标称放电电流 ( $I_n$ )。是指用来划分避雷器等级的、具有  $8/20\mu s$  波形的雷电冲击电流峰值,按照避雷器额定电压和用途不同,避雷器的标称放电电流分为 20、10、5、2.5kA 和 1.5kA 等多个等级。

(6) 避雷器的残压 ( $U_{res}$ )。是指放电电流通过避雷器时其端子间的最大电压峰值,通常是指标称放电电流下的残压。

(7) 压比。是指避雷器在波形为  $8/20\mu s$  的标称放电电流作用下的残压  $U_{10kA}$  与起始动作电压 (一般取直流 1mA 电压)  $U_{1mA}$  之比。压比 ( $U_{10kA}/U_{1mA}$ ) 越小,表明非线性越好,通过冲击大电流时的残压越低,避雷器的保护性能越好。目前产品制造水平所能达到的压比为 1.6~2.0。

(8) 荷电率。是指最大长期工作电压的幅值与起始动作电压之比。它是表示电阻片上电压负荷程度的一个参数。设计 ZnO 避雷器时为它选择一个合理的荷电率是很重要的,应综合考虑电阻片特性的稳定度、漏电流的大小、温度对伏安特性的影响、电阻片预期寿命等因素。选定的荷电率大小对电阻片的老化速度有很大的影响,一般选用 45%~75% 或更大。如在中性点非有效接地系统中,因一相接地时健全相上的电压会升至线电压,所以一般选用较小的荷电率。

(9) 保护比。是指避雷器的额定残压与最大长期工作电压峰值之比。保护比越小,表明通过冲击大电流时的残压越低,避雷器的保护性能越好。

(10) 工频耐受电压特性。考核 ZnO 避雷器对工频过电压的耐受能力的参数指标。按我国技术条件规定,对中性点非有效接地系统, ZnO 避雷器应在下列时间内耐受相应的工频过电压倍数:①  $1.2U_m$  时为 1000s;②  $1.3U_m$  时为 100s;③  $1.4U_m$  时为 1s,其中  $U_m$  为系统最大允许工作电压。

(11) 避雷器的热稳定。是指避雷器在动作负载试验后引起温度上升,在规定的环境条件下对避雷器施加规定的持续运行电压,电阻片的温度能随时间而下降,则称此避雷器是热稳定的。

(12) 避雷器的热崩溃。描述当避雷器承受的持续功率损耗超过外套和连接件的散热能力引起电阻片的温度升高,最终导致避雷器损坏的过程。

## 1.2 金属氧化物避雷器的全生命周期管理

### 1.2.1 总体要求

无间隙金属氧化物避雷器的全生命周期管理,包括避雷器选型、出厂试验见证 (必要

时)、准入式抽检和到货突击抽检、安装后的交接验收、运行维护和退运等环节,为保障避雷器的健康稳定运行,每个环节均应有相应的管理制度、技术措施和技术监督手段,认真实施,落实到位,构成避雷器全过程管理工作的完整过程。

避雷器选型是避雷器正确发挥作用和安全稳定运行的首要环节,国家和电力行业对此有完善的技术规范,运行单位的企业规范普遍不低于前者。避雷器结构比较简单,开展设备监造和出厂试验验收见证环节的必要性不大,对于存在家族性缺陷的或者怀疑存在产品问题的厂家产品,必要时建议开展关键性出厂试验项目见证工作。

### 1.2.2 金属氧化物避雷器的抽检

#### 1.2.2.1 金属氧化物避雷器抽检的重要性

金属氧化物避雷器的抽检是加强金属氧化物避雷器质量管理的一个有效手段。为了更好地了解厂家避雷器产品性能和整体质量情况,以及对不同厂产品技术性能的优劣有所掌握,对避雷器生产厂的产品质量检测进行综合评价,指导产品选型和供应商评价,对整批避雷器的准入式抽检和到货突击抽检,增加设备到货后、安装验收之前的设备把关环节,构成了更为有效的器材检验技术监督手段。

质量检测项的评价可分为强制性指标和评价性指标,任何一项强制性指标未合格,则该型号样品的质量检测项评审判定为不合格。

可以通过制订入围准则和排序准则,按单项测试结论进行判分,最后按总得分从高到低顺序进行排序。在抽检中,质量检测项合格的设备产品参加排序,判定不合格的产品不参与排序。

#### 1.2.2.2 金属氧化物避雷器的抽检项目

根据国家、行业和企业相关标准的要求,对送检的金属氧化物避雷器进行检测。抽检项目和典型检测工具如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 金属氧化物避雷器的抽检项目

| 序号      | 检测项目                | 强制性项目 | 评价性项目 | 备注         |
|---------|---------------------|-------|-------|------------|
| 1       | 资料检查                |       | √     |            |
| 2       | 外观检查                |       | √     |            |
| 避雷器本体检测 |                     |       |       |            |
| 3       | 本体绝缘电阻测量            | √     |       |            |
| 4       | 工频参考电压试验            | √     |       |            |
| 5       | 工频全电流和阻性电流试验        |       | √     |            |
| 6       | 直流 1mA 参考电压试验       | √     |       |            |
| 7       | 0.75 直流参考电压下的泄漏电流试验 |       | √     |            |
| 8       | 局部放电试验              |       | √     |            |
| 9       | 密封试验                |       | √     | 对复合绝缘外套避雷器 |

表 1-2 金属氧化物避雷器的抽检仪器和设备

| 序号 | 名称      | 参考型号或指标  | 数量 |
|----|---------|----------|----|
| 1  | 温湿度表    | WHM5     | 1  |
| 2  | 绝缘电阻测试仪 | S1-552/2 | 1  |

续表

| 序号 | 名称           | 参考型号或指标           | 数量 |
|----|--------------|-------------------|----|
| 3  | 工频试验变压器      | 0~500kV           | 1  |
| 4  | 毫安表          | 0~1000mA          | 1  |
| 5  | ZnO 避雷器带电测试仪 | AI6106            | 1  |
| 6  | 直流高压发生器      | Z-VI 300kV/3mA    | 1  |
| 7  | 微安表          | C31/1- $\mu$ A    | 1  |
| 8  | 局放仪          | TWPD-2B-4CH       | 1  |
| 9  | 冲击电压发生器      | CDYH-3600kV/540kJ |    |

### 1.2.2.3 抽检方法

#### 1.2.2.3.1 资料检查

(1) 检查参检产品铭牌参数。产品铭牌需包含避雷器型号、持续运行电压、直流 1mA 参考电压、出厂编号、制造厂名、制造年月等项目。

(2) 检查参检产品的产品质量合格证。

(3) 检查参检产品是否具有国家级机构进行的型式试验合格证书，型式试验证书需包括直流参考电压试验、0.75 直流参考电压下漏电流试验、残压试验、工频参考电压试验、方波和大电流冲击耐受试验、动作负载试验、短路电流试验、密封试验、局部放电和无线电干扰电压试验等试验项目。

(4) 检查参检产品鉴定证书。

#### 1.2.2.3.2 外观检查

(1) 总体美观、外观清洁、无放电痕迹。

(2) 外部表面检查无裂纹、无破损变形。

(3) 封口处检查密封良好。

(4) 复合外套应检查每只带间隙避雷器的串联间隙的距离尺寸，以保证避雷器放电电压的性能。复合外套表面单个缺陷面积（如缺胶、杂质、凸起等）不应超过  $5\text{mm}^2$ ，深度不大于 1mm，凸起表面与缝合应清理平整，凸起高度不应超过 0.8mm，黏接缝凸起高度不应超过 1.2mm，总缺陷面积不应超过复合外套总表面积的 0.2%。

#### 1.2.2.3.3 避雷器本体检测

(1) 本体绝缘电阻测量。避雷器本体绝缘电阻应不小于  $1000\text{M}\Omega$ 。

(2) 工频参考电压试验。对避雷器施加工频电压，当通过试品的阻性电流（峰值）等于工频参考电流（由厂家给定）时，测出试品上的工频电压峰值。工频参考电压等于该工频电压峰值除以  $\sqrt{2}$ ，应不小于避雷器的额定电压值。

(3) 工频全电流和阻性电流试验。对试品施加最高持续运行电压，测量通过试品的全电流和阻性电流。测得的电流值应不大于厂家给定值。

(4) 直流 1mA 参考电压试验。对试品施加直流高电压，测量其在直流 1mA 时的直流电压。要求直流 1mA 时的直流电压不低于 GB 11032—2010《交流无间隙金属氧化物避雷器》和厂家技术标准的要求。

(5) 0.75 直流参考电压下的泄漏电流试验。测量避雷器在 0.75 直流 1mA 参考电压下的泄漏电流，其值不应大于  $50\mu\text{A}$ 。

(6) 局部放电试验。测量 1.05 倍持续运行电压下避雷器本体的局部放电量，其值不应大于 10pC。

1.2.2.3.4 密封试验

将复合绝缘外套避雷器试品放入含量为 1kg/m<sup>3</sup> 的 NaCl 沸水中煮 42h 之后，立即放入温度为环境温度的水中浸泡 24h，将试品从水中取出，在环境温度下放置 24h，直至试品表面水分晾干。重新进行 1.2.1.3.3 的各项试验，检查试品外套部分无任何机械性的变化，不应有开裂和脱落现象，且要求试验前后避雷器直流 1mA 参考电压变化小于 5%，0.75 直流参考电压下的泄漏电流变化小于 20μA，阻性电流值相对于初始测量值的增加值应小于 20%，在 1.05 倍持续运行电压下局部放电量不大于 10pC。

1.2.2.4 检测结果判定

根据国家、行业和企业相关标准的要求，制订企业金属氧化物避雷器准入质量抽检或到货突击评价方案，以及制订入围准则，按单项测试结论进行判分，参见表 1-3 和表 1-4，供参考。

表 1-3 金属氧化物避雷器的抽检检测评价表

| 序号      | 检测项目                | 入围准则  |       | 排序准则 |         |    |
|---------|---------------------|-------|-------|------|---------|----|
|         |                     | 强制性项目 | 评价性项目 | 分值   | 评分办法    | 得分 |
| 1       | 资料检查                |       | √     | 10   | 参考表 1-4 |    |
| 2       | 外观检查                |       | √     | 10   | 参考表 1-4 |    |
| 避雷器本体检测 |                     |       |       |      |         |    |
| 3       | 本体绝缘电阻测量            | √     |       | 5    | 参考表 1-4 |    |
| 4       | 工频参考电压试验            | √     |       | 10   | 参考表 1-4 |    |
| 5       | 工频全电流和阻性电流试验        |       | √     | 15   | 参考表 1-4 |    |
| 6       | 直流 1mA 参考电压试验       | √     |       | 10   | 参考表 1-4 |    |
| 7       | 0.75 直流参考电压下的泄漏电流试验 |       | √     | 15   | 参考表 1-4 |    |
| 8       | 局部放电试验              | √     |       | 10   | 参考表 1-4 |    |
| 9       | 密封试验                | √     |       | 15   | 参考表 1-4 |    |
| 检测结果    |                     |       |       | 总分   |         |    |

表 1-4 金属氧化物避雷器的抽检评价指标评分标准

| 序号 | 考核内容 | 技术要求                                                                                                                                                                                                                                                | 最高分数 | 备注                                                                              |
|----|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 资料检查 | (1) 检查参检产品铭牌参数。产品铭牌需包含避雷器型号、持续运行电压、直流 1mA 参考电压、出厂编号、制造厂名、制造年月等项目。<br>(2) 检查参检产品的产品质量合格证。<br>(3) 检查参检产品是否具有国家级机构进行的型式试验合格证书，型式试验证书需包括直流参考电压试验、0.75 直流参考电压下漏电流试验、残压试验、工频参考电压试验、方波和大电流冲击耐受试验、动作负载试验、短路电流试验、密封试验、局部放电和无线电干扰电压试验等试验项目。<br>(4) 检查参检产品鉴定证书 | 10   | 全部满足要求：10 分；<br>一项不符合要求：7.5 分；<br>两项不符合要求：5 分；<br>三项不符合要求：2.5 分；<br>全部不符合要求：0 分 |

续表

| 序号      | 考核内容                   | 技术要求                                                                                                                                                                                                                                                                              | 最高分数 | 备注                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2       | 外观检查                   | (1) 总体美观、外观清洁、无放电痕迹。<br>(2) 外部表面检查无裂纹、无破损变形。<br>(3) 封口处检查密封良好。<br>(4) 复合外套应检查每只带间隙避雷器的串联间隙的距离尺寸, 以保证避雷器放电电压的性能。复合外套表面单个缺陷面积(如缺胶、杂质、凸起等)不应超过 $5\text{mm}^2$ , 深度不大于 $1\text{mm}$ , 凸起表面与合缝应清理平整, 凸起高度不应超过 $0.8\text{mm}$ , 黏结缝凸起高度不应超过 $1.2\text{mm}$ , 总缺陷面积不应超过复合外套总表面积的 $0.2\%$ | 10   | 全部满足要求: 10 分;<br>一项不符合要求: 7.5 分;<br>两项不符合要求: 5 分;<br>三项不符合要求: 2.5 分;<br>全部不符合要求: 0 分                                                                                                                                                                                          |
| 避雷器本体检测 |                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 3       | 本体绝缘电阻测量               | 本体绝缘电阻应不小于 $1000\text{M}\Omega$                                                                                                                                                                                                                                                   | 5    | 满足要求: 5 分;<br>不符合要求: 0 分                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 4       | 工频参考电压试验               | 避雷器直流 $1\text{mA}$ 参考电压应不小于制造厂的给定值                                                                                                                                                                                                                                                | 10   | 符合要求: 10 分;<br>不符合要求: 0 分                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 5       | 工频全电流和阻性电流试验           | 对试品施加最高持续运行电压, 测量通过试品的全电流和阻性电流。<br>(1) 测得的全电流值应不大于厂家给定值。<br>(2) 测得的阻性电流值应不大于厂家给定值                                                                                                                                                                                                 | 15   | 每一项符合要求: 基准分 5 分;<br>不符合要求: 0 分;<br>以符合厂家要求的全电流和阻性电流最大测量值为基准, 每低 $10\%$ 得 2 分 (两个电流分别算), 低 $20\%$ 得 3 分, 以此类推, 最高 10 分                                                                                                                                                        |
| 6       | 直流 $1\text{mA}$ 参考电压试验 | 对试品施加直流高电压, 测量其在直流 $1\text{mA}$ 时的直流电压。要求不低于 GB 11032—2010 和厂家技术标准的要求                                                                                                                                                                                                             | 0    | 符合要求: 10 分;<br>不符合要求: 0 分                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 7       | $0.75$ 直流参考电压下的泄漏电流试验  | 测量避雷器在 $0.75$ 直流 $1\text{mA}$ 参考电压下的泄漏电流, 其值不应大于 $50\mu\text{A}$                                                                                                                                                                                                                  | 15   | 大于或等于 $50\mu\text{A}$ : 0 分;<br>大于或等于 $40\mu\text{A}$ 且小于 $50\mu\text{A}$ : 11 分;<br>大于或等于 $30\mu\text{A}$ 且小于 $40\mu\text{A}$ : 12 分;<br>大于或等于 $20\mu\text{A}$ 且小于 $30\mu\text{A}$ : 13 分;<br>大于或等于 $10\mu\text{A}$ 且小于 $20\mu\text{A}$ : 14 分;<br>小于 $10\mu\text{A}$ : 15 分 |
| 8       | 局部放电试验                 | 避雷器两端电压升至额定电压, 保持 $2\sim 10\text{s}$ , 然后降到试品的 $1.05$ 倍持续运行电压, 测量避雷器本体的局部放电量, 其值不应大于 $10\text{pC}$                                                                                                                                                                                | 10   | 大于或等于 $10\text{pC}$ : 0 分;<br>小于 $10\text{pC}$ : 10 分                                                                                                                                                                                                                         |
| 9       | 密封试验                   | 水煮后, 试品外套部分无任何机械性的变化, 不应有开裂和脱落现象, 且要求试验前后避雷器直流 $1\text{mA}$ 参考电压变化小于 $5\%$ , $0.75$ 直流参考电压下的泄漏电流变化小于 $20\mu\text{A}$ , 阻性电流值相对于初始测量值的增加值应小于 $20\%$ , 在 $1.05$ 倍持续运行电压下局部放电量不大于 $10\text{pC}$                                                                                      | 15   | 全部满足要求: 15 分; 不满足要求每项扣 5 分, 扣完为止                                                                                                                                                                                                                                              |

### 1.2.3 金属氧化物避雷器的交接验收

#### 1.2.3.1 国家标准的有关要求

GB 50150—2006《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》明确了金属氧化物避雷器试验项目和要求。

金属氧化物避雷器的试验项目，应包括下列内容：

- (1) 测量金属氧化物避雷器及底座绝缘电阻。
- (2) 测量金属氧化物避雷器的工频参考电压和持续电流。
- (3) 测量金属氧化物避雷器直流参考电压和 0.75 直流参考电压下的泄漏电流。
- (4) 检查放电计数器动作情况及监视电流表指示。
- (5) 工频放电电压试验。

其中，无间隙金属氧化物避雷器的试验项目应包括第 (1)~(4) 项的内容，不带均压电容器的，第 (2)、(3) 两项可选做一项；带均压电容器的，应做第 (2) 项。有间隙金属氧化物避雷器的试验项目按第 (1) 和 (5) 项。

由于无间隙金属氧化物避雷器运行后的带电测试取代停电直流电气测试已成为预防性试验的发展趋势，为了提供带电测试历史数据比较的基准值，建议有条件的情况下，交接验收试验应尽量进行工频参考电压和持续电流测试，结合直流参考电压和 0.75 直流参考电压下的泄漏电流测试，实现对避雷器更全面的交接验收评价。

金属氧化物避雷器及底座绝缘电阻测量值应符合下列规定：

- (1) 35kV 以上电压：用 5000V 绝缘电阻表测量，本体绝缘电阻不小于 2500M $\Omega$ 。
- (2) 35kV 及以下电压：用 2500V 绝缘电阻表测量，本体绝缘电阻不小于 1000M $\Omega$ 。
- (3) 低压 (1kV 以下)：用 500V 绝缘电阻表测量，本体绝缘电阻不小于 2M $\Omega$ 。
- (4) 底座绝缘电阻不低于 5M $\Omega$ 。

金属氧化物避雷器的工频参考电压和持续电流测量时，对应于工频参考电流下的工频参考电压，整支或分节进行的测试值，应符合 GB 11032—2010 或产品技术文件的规定；测量避雷器持续运行电压下的持续电流，其阻性电流和全电流值应符合产品技术文件的规定，其中，持续运行电压值参见 GB 11032—2010。

金属氧化物避雷器直流参考电压和 0.75 直流参考电压下的泄漏电流测量时，对应于直流参考电流下的直流参考电压，整支或分节进行的测试值，应不低于 GB 11032—2010 中表 J.3 的规定值，其值符合产品技术文件的规定。实测值与制造厂实测值比较，变化不应大于  $\pm 5\%$ 。0.75 直流参考电压下的泄漏电流值不应大于 50 $\mu$ A，或符合产品技术文件的规定。

直流电气试验时，若整流回路中的波纹系数大于 1.5% 时，应加装滤波电容器，电容量可为 0.01~0.1 $\mu$ F，试验电压应在高压侧测量。

检查放电计数器的动作应可靠，避雷器监视电流表指示应良好。

#### 1.2.3.2 交接验收的总体要求和条件

为规范金属氧化物避雷器安装后的交接验收工作，提高验收工作质量，确保避雷器以健康的状态投入运行，应严格遵循相应的规章制度，其中验收文档的编制是其中一项规范化工作。

对避雷器验收工作的总体要求，包括：

- (1) 避雷器的验收必须按照变电主设备验收程序进行。
- (2) 验收人员根据技术协议、设计图纸、技术规范和验收文档开展现场验收。

(3) 验收中发现的问题必须限时整改,存在较多问题或重大问题的,整改完毕应重新组织验收。

(4) 验收完成后,必须完成相关图纸的校核修订。

(5) 变电运行单位应将竣工图纸和验收文档存放在变电站或输电线路管理部门。

(6) 施工单位将备品、备件移交运行单位。

验收前应具备的条件:

(1) 变电站避雷器本体和底座已安装就位。

(2) 输电线路避雷器本体(和合成绝缘串联间隙)已安装就位。

(3) 避雷器的所有引线和接地引下线全部安装完成。

(4) 避雷器全电流监测装置(或放电计数器)已安装完成。

(5) 已完成对避雷器本体和附件(包括底座或合成绝缘串联间隙、全电流监测装置或放电计数器)的交接验收试验。

(6) 避雷器本体和附件标识符合相关的安健环设施标准要求。

(7) 避雷器的验收文档、安装调试报告已编制并经审核完毕。

### 1.2.3.3 避雷器的资料验收

新建、扩建、改造工程的避雷器应检查已具备以下相关资料及可修改的电子化图纸资料:

(1) 一次接线图(含运行编号)。

(2) 设备技术协议。

(3) 变更设计的证明文件。

(4) 变更设计的实际施工图。

(5) 制造厂提供的主、附件产品中文说明书。

(6) 制造厂提供的主、附件产品试验记录。

(7) 制造厂提供的主、附件合格证书。

(8) 制造厂提供的安装图纸。

(9) 重要文件和会议纪要。

(10) 运输过程质量控制文件。

(11) 缺陷处理报告。

(12) 现场安装及调试报告。

(13) 避雷器本体和附件(包括底座、全电流监测装置或放电计数器)的交接验收记录及试验报告。

(14) 设备、专用工具及备品清单。

### 1.2.3.4 避雷器的验收

#### 1.2.3.4.1 检查避雷器本体和附件的外观和数量

(1) 对照本体和附件设备清单,检查设备现场配置情况,应与清单内容和数量相符。

(2) 总体美观、外观清洁。

(3) 铭牌标志清楚,符合相关安健环设施标准的要求。

(4) 上(中、下)节安装顺序和位置正确。

(5) 相序标志清晰、正确。

(6) 外部表面检查无裂纹、无破损变形。

(7) 无放电痕迹。

(8) 封口处检查密封良好。