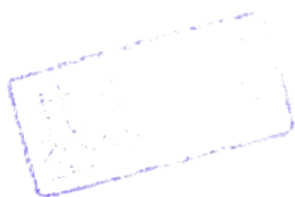


976190

1986
0018

高等学校教材



配电网过电压

武汉水利电力大学·方瑜 编



高等学校教材

配电网过电压

武汉水利电力大学 方瑜 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书系统地阐述了配电网中常见过电压的形成过程及其影响因素和限制措施,并着重理论分析与实际应用相结合。对氧化锌避雷器、消弧线圈和接地装置作了较详细的介绍。此外,对配电网中性点选用低电阻接地的运行方式进行了分析。

本书可作为高等学校电力系统及其自动化、变电配电专业和其他电力类专业的选修课教材,也可供电力类专业的研究生和电力系统工程技术人员阅读参考。

高等学校教材 配 电 网 过 电 压

武汉水利电力大学 方瑜 编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 9.25印张 297千字

1994年10月第一版 1994年10月北京第一次印刷

印数 0001—1089册

ISBN 7-129-02008-0/TM·542

定价 5.40元

前 言

配电网通常是指 63kV 及以下电压等级,直接向广大用户供电的电力网。配电网分布广、电气设备众多、绝缘水平低、故障率高。

配电网的过电压问题与高压、超高压电网是有区别的。如:防雷方面要注意感应雷过电压的防护;内部过电压方面有间歇电弧接地过电压、开断并联补偿电容器过电压、开断高压感应电动机过电压等配电网中特有的过电压,以及与高压电网相比,易发生的断线引起的谐振过电压。这些过电压严重地威胁着设备的绝缘。只有系统地分析这些过电压的形成过程及影响因素,才能合理有效地采取限制措施,保证电网安全运行。

本书是电力系统及其自动化专业的选修课教材,是在其前修课《高电压技术》的基础上,对配电网过电压方面的内容,加以引深和扩大。书中对电力系统过电压的一些基础理论和知识,如集中参数电路的过渡过程、波过程、雷闪、雷电参数、避雷针、碳化硅避雷器、各类谐振机理、电力系统绝缘配合等内容不再重叙,但对氧化锌避雷器、消弧线圈和接地装置作了较详细的补充介绍。然后,较深入地论述了配电网防雷、操作过电压和谐振过电压问题。随着我国一些城市配电网结构的变化,电网中性点接地方式的选择正在探讨之中。众所周知,中性点接地方式是与过电压问题直接相关的,因而,最后一章,对配电网中性点采用经电阻接地的运行方式作了介绍。在编写中,着重于阐明物理概念和分析方法,深入浅出,结合工程实际,注意吸收国内外生产和科研的新成就、新方法、新动向,力图使学生具有初步分析配电网过电压的能力。

本书由华中理工大学梁毓锦教授主审。在编写过程中得到兄弟院校及电力部门的大力支持和帮助,在此致以深切的谢意。

由于编者水平有限,不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1993年8月

101064

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 配电网的发展	1
第二节 配电网的过电压问题	2
第三节 研究过电压的方法	3
第二章 金属氧化物避雷器	7
第一节 金属氧化物非线性电阻片	7
第二节 氧化锌避雷器的基本工作原理及特点	10
第三节 氧化锌避雷器的主要特性参数	13
第四节 提高氧化锌避雷器保护性能的措施	16
第五节 配电网氧化锌避雷器的选择	17
第六节 氧化锌避雷器运行稳定性的检测	22
第三章 消弧线圈	28
第一节 消弧线圈的功能	28
第二节 补偿电网中性点位移电压	31
第三节 消弧线圈的调谐	34
第四节 消弧线圈的自动调谐	38
第五节 消弧线圈容量和安装地点的选择	40
第六节 提高消弧线圈动作成功率措施	42
第四章 接地装置	44
第一节 接地	44
第二节 接地体的接地电阻	45
第三节 接地电阻计算	49
第四节 降低接地电阻的措施	54
第五节 降阻剂	55
第五章 配电网防雷	60
第一节 架空线路的感应雷过电压	60
第二节 架空配电线路防雷	64
第三节 电力电缆护层过电压及防护	68
第四节 配电变压器防雷	70
第五节 低压架空接户线防雷	72
第六章 配电网操作过电压	74
第一节 间歇电弧接地过电压	74
第二节 投切并联电容器组过电压	81
第三节 开断空载线路过电压	93
第四节 开断高压电动机过电压	96

第五节 开断电弧炉变压器过电压	103
第六节 带接地故障开断消弧线圈过电压	106
第七章 配电网谐振过电压	109
第一节 概述	109
第二节 不对称短路引起的工频电压升高	111
第三节 传递过电压	113
第四节 断线引起的谐振过电压	116
第五节 电磁式电压互感器铁芯饱和引起的过电压	121
第六节 配电变压器绕组一点接地过电压	130
第七节 定相过电压	131
第八章 中性点经电阻接地的运行方式	134
第一节 采用中性点经电阻接地的原因	134
第二节 中性点接地电阻值的选择	135
第三节 中性点接地电阻的接入	138
第四节 中性点经低电阻接地电网电气设备绝缘水平	139
参考文献	141

第一章 绪 论

第一节 配电网的发展

随着我国工农业生产迅速发展,城乡电力负荷大幅度增长。为满足生产和人民生活的需要,我国配电网整顿了电压等级,扩大了供电范围,改善了电网结构,新技术、新设备得到了广泛应用,供电可靠性和电能质量都有了明显的提高,尤其是开放城市的市区电网更显突出。归纳起来有以下几方面的发展:

(1) 发展环网供电。长期以来,我国配电网是采用以架空线路为主的放射型供电方式。这些放射形线路上接有许多配电变压器,一旦馈电线故障,断路器跳闸,必然造成大面积停电。另外,由于负荷重、线路长、单电源供电、自动化程度低、无备用设备和容量导致电网应变能力很差,以及为解决供需矛盾及维护检修的需要,人为拉闸断电的事也常有发生。为改变这种状况,不少城市电网已逐步改造为环网供电的方式,如图1-1所示。环网供电不仅能提高电网的应变能力,提高供电可靠性,而且简化接线,减少占地面积,安装维护方便,也改变了一个变电站有10多路,甚至20多路出线时,站址周围电杆林立,极不美观的景象。

(2) 架空绝缘导线的应用,使配电网改变了旧貌。架空绝缘导线又称自身承载式架空电缆,最初是在聚氯乙烯电缆中加一根钢丝吊线,为降低造价,现用交联聚乙烯的芯线,绞合在一根吊线上而成。其优点是供电安全可靠;安装施工和带电作业简便;运行维护工作量小;有利于城市绿化,林木毋须修剪;降低漏电损耗,减小火灾和防止窃电等。显然,比传统的

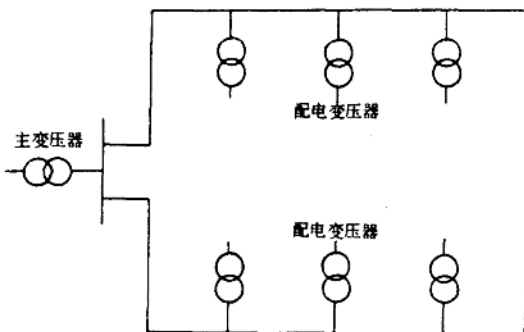


图 1-1 环网供电方式

裸线优越,又比地下电缆便宜。绝缘导线已在70多个国家中推广应用。

(3) 推广新型电气设备。随着城市的发展,建站占地愈来愈困难,因此,如SF₆开关柜、干式变压器、全封闭配电站等紧凑型电气设备的应用愈来愈多,这也是城市电力网建设的一种趋势。

(4) 氧化锌避雷器是70年代发展起来的新技术,目前已在我国配电网中得到较广泛的应用,这种新型避雷器对电气设备绝缘的安全运行起着重要的作用。由于氧化锌避雷器优异的非线性特性,不仅可限制相对地过电压,也降低了相间过电压,为缩小电气设备相间距离,研制小型化设备提供了可能性。

(5) 各种自动装置和计算机的应用,使配电网调度、监控达到新水平,保证了电网的经济运行。

(6) 配电网中性点接地方式,我国一直沿用不接地和经消弧线圈接地两种。随着城市电力网中电缆线路大幅度增加,电容电流很大,以及因某些进口设备绝缘水平较低,原来中性点接地方式有些不适应,我国个别城市配电网已改用中性点经低电阻接地的运行方式。

(7) 乡镇配电网,虽然是以架空线路为主的放射型电网,但重合闸装置的普遍应用,线路瓷横担的推广,配电变压器质量的提高,以及维护、监测、管理的加强,供电可靠性亦有明显的改善。

配电网承担着直接向用户供电的任务,随着生产的发展,势必促使供电系统的发展。可以预见,今后的配电网会得到人们更多的重视,新技术、新设备的应用会更快、更广,供电质量将会进一步提高,可更好地满足国民经济发展的需要。

第二节 配电网的过电压问题

配电网具有分布广、设备多、绝缘水平低的特点,易因过电压造成绝缘事故。运行经验表明,配电网的过电压事故约占整个电力系统过电压事故的70%~80%,严重地威胁着安全供电。

配电网过电压主要有以下几种。

一、雷电过电压

配电线路电压等级较低(一般在35kV及以下),线路杆塔不高,易受建筑物和树木的屏蔽,雷直击线路的概率比高压输电线路小,但因其绝缘水平低,非直击雷(感应雷过电压)将成为线路雷害跳闸增多的主要原因。虽然,感应雷的形成和计算的推导,在一定的假设前提下,已获得与客观存在基本一致的结论。但在应用时,仍要按具体条件多做分析。例如,线路走向不可能不变,极端情况,若为环形。雷击环中心地面,则导线上的感应雷过电压要比用公式计算的大得多。

配电架空线路的防雷问题,是目前尚没有很好解决的问题之一。

配电变压器防雷是配电网防雷的另一突出问题。据统计,我国配电变压器因雷害损坏的数量可达总台数的1%,一个地区供电局,有千台以上的配电变压器,每年雷害损坏的数量相当可观。一台配电变压器的损坏,将使某一范围内长时间停电,影响较大。目前,配电变压器防雷已有较统一的接线方式,关键在于认真实施和推广应用,并进一步总结完善。

低压接户线的防雷易被人们忽视,据部分地区统计,雷害造成电能表损坏率高达1.7%~6.6%,尤为严重的是,曾多次发生人身伤亡事故。

二、操作过电压

弧光接地过电压(间歇性电弧接地过电压)是配电网中典型的操作过电压。这种过电压幅值高、持续时间长,对设备绝缘和氧化锌避雷器的安全运行威胁较大。目前,限制这

种过电压的主要措施仍是电网中性点经消弧线圈接地。由于电网运行方式的多变,如何正确调谐消弧线圈;如何降低电网不对称电压,降低消弧线圈的脱谐度,提高动作成功率;以及如何限制因弧光接地过电压而导致相间闪络等方面,都还在探讨之中。

由于电网调压的要求,并联补偿电容器组须频繁操作。在切合电容器组操作中产生的过电压与切合空载线路类似,但因其容量大,为限制过电压,在断路器和氧化锌避雷器的选择方面,近年来做了大量的研究工作。

开断高压感应电动机产生的过电压与开断空载变压器过电压有相同之处,也有十分明显的不同之处。还有,开断电弧炉变压器产生的过电压因其结构和运行的特点,在采取限制措施时有一定的难度,需有特定的方法。

三、谐振过电压

中性点不接地系统中,电磁式电压互感器饱和引起的谐振过电压是令人烦恼的事。限制这种过电压的措施是多种多样的,具体到某一电网选用哪种措施有效,则必须在比较现有的各种措施后,才能做合理的抉择。

断线在配电网中时有发生,断线引起的谐振过电压亦常随之出现。为防止断线,应在导线截面选择和继电保护整定值上多加考虑。从防止谐振的角度出发,应预先对配电网络作电路分析,计算可能产生谐振的条件,从而设法躲开谐振参数的配合,避免形成过电压。

传递过电压是由于高压绕组或高压线路上出现零序电压,通过电磁耦合在低压绕组或低压线路上产生的过电压。因配电网绝缘水平低,对高压侧绝缘并无危险的过电压,传递至低压侧就易造成绝缘事故。在配电网中要重视并采取限制措施。

配电网过电压与电网中性点运行方式的选择是密切相关的。若配电网中性点改用经低电阻接地,则电网的过电压和设备绝缘水平的要求,均相应地有所变化。

总之,配电网中存在着不少过电压问题,出现过电压的频率比高压电网要高,在深入研究高压、超高压和特高压电网过电压的同时,配电网过电压问题也亟待研究和解决。

第三节 研究过电压的方法

电力系统过电压、尤其是雷电过电压,各种影响因素的随机性很大。过电压的出现及其幅值的大小均具有强烈的统计性。在研究过电压问题时,除了系统的理论分析外,可运用模拟试验、数值计算和现场测量等手段,达到相互补充、相互验证的效果,有利于深入揭露现象的本质。

一、模拟方法

使用模拟装置分析过电压是一种传统方法。常用的模拟装置有防雷分析仪和内部过电压模拟装置或称暂态网络分析仪(TNA)。模拟法的优点是可清楚地观察到各种类型过电压的发展过程,并能方便地研究限制措施,干预这种过程的产生和消除。

要使模拟系统与原型系统中所发生的物理过程相似,必须满足一定的模拟条件,模型量与原型量之间应对应地有无穷小的固定比例系数,即模拟比。电力系统的模拟有

$$\frac{u_m}{u} = M_u, \quad \frac{i_m}{i} = M_i, \quad \frac{L_m}{L} = M_L, \quad \frac{C_m}{C} = M_C, \quad \frac{R_m}{R} = M_R$$

式中有下标 m 者为模型量，无下标者为原型量， M 为模拟比。按这种规则的组称相似性准则。

模拟方法有数学模拟和物理模拟两种。数学模拟中模型与原型的物理过程可以不同，不过这些过程应按同一形式的方程式进行变化。在物理模拟中，模型量与原型量的区别只是大小比例不同，其物理本质是完全一样的，故物理模拟是保持同一物理本质的模拟。可见数学模拟是各种现象之间方程的等形，物理模拟是各种原型的直接缩影。

应用模拟装置研究过电压的范围是很广泛的。通常，在防雷分析仪上进行变电站防雷接线试验，测量不同进波时各点过电压值，观察各种因素对过电压的影响规律，拟定合理的防雷方案；在暂态网络分析仪上，可根据系统运行状况，观察和测量系统中出现的工频暂态过电压、操作过电压和谐振过电压的发展、波形、幅值，以及限制措施的效果等等。

二、数值计算法

利用计算机的计算功能进行电力系统暂态和稳态计算是研究过电压的新手段。对计算机而言，它不像模拟装置那样，因受设备限制有难以广泛改变系统接线和调节元件特性的困难。应用计算机进行数值分析，具有改变参数方便，规模不受限制，计算速度快、精度高，费用小等优点。

一般，在数值计算前，须将实际系统简化，得出等值计算系统，确立计算模型，选择计算方法。目前，应用较多的方法有：

- 1) 行波法。包括网格法；微增量法；贝杰龙 (Bergeron) 法。
- 2) 富 (拉) 氏变换法。
- 3) 差分法。

这些方法各有长处，如贝杰龙法适应性强，处理大型网络比较方便；富氏变换法、网格法反映的物理概念较清晰；富氏变换法能自然引入参数的频率特性；差分法计算精度较高等。

值得提出的是，不要单纯追求计算方法的很高精度，因计算结果是否符合实际，很大程度上决定于输入的原始参数是否准确。

运用数值计算，免不了要有程序。若自编程序，则是件费时、费力的事，目前已有不少可供选择的通用性程序，其中最具有代表性的是70年代初期，道米尔 (Dommel) 等人采用贝杰龙法完成的BPA (Bonneville Power Administration^①) 通用电磁暂态程序EMTP (Electro-magnetic Transient Program)，它能进行大型复杂系统的各种电磁暂态过程的计算，在世界上得到广泛的应用，并在不断发展和完善。作为一种工具，使用前应先了解此程序的功能及使用方法，才能达到预定的计算目的。

三、现场测量法

在运行电网中测量、记录过电压幅值和波形，是在此特定条件下最有权权威性的数据，

① 伯尼维尔电力管理处 (美国)。

问题在于这种研究方法有较大的局限性，它不可能在大范围内变动运行接线及元件参数，也不可能人为地剔除或控制一些影响因素而突出另一些影响因素，来研究过电压的发展规律。试验次数也受到限制。当然，更无法把现场测量法使用于设计中的电网。

现场测量有两方面内容。一是根据预定目的，有计划地安排在运行电网中进行过电压试验；二是在电网中安装自动记录器，常年监测，积累资料。

1. 现场试验

这是研究过电压最直观的方法。试验前要周密地制定试验方案，说明试验目的、内容、接线方式、操作步骤，所需仪器设备、安全措施及组织分工等，经有关部门审定后才能实施。试验中，量测接线和仪器仪表的选择是否正确，测量信号的选择是否合理齐全，对试验结果将有很大的影响。

2. 运行监测

故障录波器，特别是带记忆功能的全过程故障录波器，是电力系统分析各种事故、提高电网运行水平的重要装置。利用录波器能判别电网有无故障、什么性质的故障、故障发生和消失的时间以及判断故障地点，能清晰地掌握故障相电流、电压的变化。这些不仅为短路故障分析、系统振荡分析、继电保护动作分析以及电气设备故障分析提供依据，也为系统过电压分析提供了依据。

过电压幅值记录器是记录安装点呈现内部过电压的专用仪器（有时，也记录少量的雷电过电压），它通过电容分压装置（如套管电容）接入电网，如图1-2所示。仪器由过电压本身启动，当外加电压超过仪器某级整定值时，就会记录过电压的幅值和次数。这种仪器既可用于长期运行记录，也可作为现场试验的测试工具。

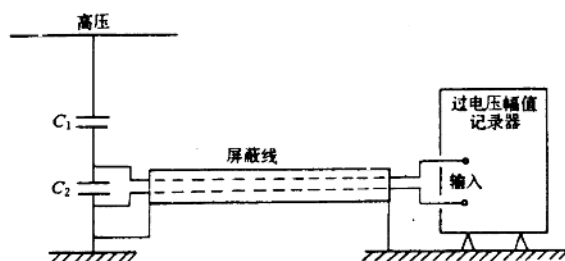


图 1-2 过电压幅值记录器的接入

C_1 —电容分压器高压臂电容； C_2 —电容分压器低压臂电容

研究分析雷电过电压时，雷电流幅值、陡度、极性、雷击杆塔时雷电流的分布，通过避雷器的雷电流幅值等等参数是十分重要的。应用磁钢棒测量雷电参数虽较麻烦，也不甚准确，但成本低，测量点可随意选择，便于基层使用。只要坚持不懈地定期检测记录，积累数据，是很有益的。我国雷电流概率曲线就是从大量记录数据中归纳出来的。

70年代中期，美国首先应用雷电定向定位系统观察雷电活动，自动记录雷电参数。我国在1985年后也开始应用这种先进仪器。雷电定向定位系统能以极大的样本量获得雷电流幅值的概率分布，可测定落雷密度和多雷区，推算线路受雷宽度，指示线路雷击点位置，

避免全线巡视，缩短抢修时间。该系统还可作雷暴临近的预警，预警时间能长达4h以上，为电网运行、水利、交通、航天、人民生活等方面提供预防时间，减小损失。

对于雷电的测量，人们一直是被动等待着自然雷击的，现在法国和日本已掌握了火箭引雷技术，将雷电按人的意志落在固定点上，这样既能消除雷害，又可测量研究，造就了一个良好的大自然实验室。

上述研究过电压的方法是相辅相成的，不可偏废，随着技术的进步，研究过电压的手段也会越来越先进。限于篇幅，这方面的内容恕不展开。

第二章 金属氧化物避雷器

金属氧化物避雷器 (Metal Oxide Surge Arresters——简称为MOA) 因其保护性能的优越, 已有替代传统的碳化硅避雷器 (Silicon Carbide Surge Arresters——简称为SCA) 的趋势。MOA的主要元件是金属氧化物非线性电阻片 (Metal Oxide Varistors——简称为MOV)。MOV的主要成份是氧化锌 (ZnO), 因而, 俗称MOV为氧化锌阀片、MOA为氧化锌避雷器。MOA就其结构不同, 可分为无间隙氧化锌避雷器和有间隙氧化锌避雷器。通常, 不指明是有间隙, 即为无间隙氧化锌避雷器。若按用途不同, 可分为交流氧化锌避雷器和直流氧化锌避雷器。在此, 只讨论交流氧化锌避雷器。

第一节 金属氧化物非线性电阻片

金属氧化物非线性电阻片 (MOV) 具有优异的非线性伏安特性, 是理想的过电压保护器件。

一、金属氧化物非线性电阻片的构成

通常, MOV是由氧化锌 (ZnO)、氧化铋 (Bi_2O_3)、氧化钴 (Co_2O_3)、氧化锑 (Sb_2O_3)、氧化锰 (MnO_2)、氧化铬 (Cr_2O_3)、氧化硅 (SiO_2)、氧化亚镍 (NiO)、氧化铅 (PbO)、氧化镧 (La_2O_3) 等金属氧化物组成。其中, ZnO 占总摩尔数的90%以上。在制作中, 先按配方将各组成元素进行配料, 经混合、加添加剂、造粒、成型后, 在 1250°C 的高温下烧结成电阻片, 再经端面研磨、端面喷涂电极 (金属层)、侧面上釉等工序, 制成完整的MOV。

MOV的微观结构如图2-1所示。它由 ZnO 晶粒、晶界层和尖晶石三部分组成。 ZnO 晶粒是结构的主体, 晶粒中固溶有微量的钴、锰等元素, 晶粒直径由数微米至 $100\mu\text{m}$, 晶粒的电阻率较低, 约为 $0.5\sim 2.7\Omega\cdot\text{cm}$ 。包围在 ZnO 晶粒外的是晶界层。晶界层将各晶粒隔开, 晶界层的厚度由 $20\sim 2000\text{\AA}$, 主要成份是 Bi_2O_3 , 也包含有微量的锌和其他金属氧化物, 其电阻率在低电场下约为 $10^{12}\sim 10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$ 。当层间电位梯度达 $10^4\sim 10^5\text{V/cm}$ 时, 其电阻骤然下降, 此时, MOV由晶界层所决定的高阻状态过渡至由晶粒电阻决定的低阻状态, 使电阻片具有明显的压敏特性。尖晶石是氧化锌和氧化锑为主组成的复合氧化物 ($\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$), 其粒径约 $3\mu\text{m}$, 零星分散在氧化锌晶粒之间, 尖晶石的作用是在烧结过程中, 抑制 ZnO 晶粒的过分长大, 以免晶界层减少, 非线性特性变差。

组成MOV各种原料成份对电阻片结构及性能的影响, 参见表2-1。

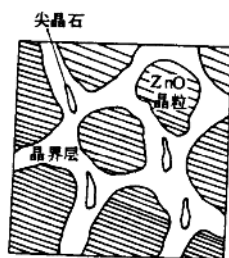


图 2-1 ZnO 电阻片显微结构

表 2-1

ZnO电阻片各原料成份对电阻片的影响

原 料	加入量 (%)	对结构的影响	对性能的影响
ZnO	94~97	高温时, 氧缺位, Zn原子过剩, 形成N型半导体	形成ZnO晶粒的非线性
B ₂ O ₃	0.2~2	ZnO晶粒间形成富铋高阻晶界层(P型)	形成ZnO绕结体的非线性
Sb ₂ O ₃	0.1~3	受主杂质, 抑制ZnO晶粒较大, 均匀瓷质结构	↑稳定性, ↑U _{1mA} , ↓I _{ci} , ↑α
Co ₂ O ₃	0.8~3	受主杂质	↑α, ↓I _{ci} , ↑稳定性
MnO ₂ (MnCO ₃)	0.1~2	受主杂质, 助长晶粒生长	↑α, ↑U _{1mA} , ↓I _{ci}
Cr ₂ O ₃	0.1~2	受主杂质, 降低ZnO本体电阻, 抑制ZnO晶粒长大	↑稳定性, ↓I _{ci} , ↑U _{1mA}
SiO ₂	0.5~4	受主杂质, 抑制ZnO晶粒发育, 稳定晶界层	↑U _{1mA} , ↑α, ↑冲击稳定性
NiO	0.1~3	受主杂质	↓压比, ↑I _{ci} , ↑方波容量, ↑冲击稳定性
B ₂ O ₃	0.01~1	施主杂质, 增大ZnO电导率, 促进ZnO晶粒长大 稳定晶界层	↑I _{ci} , ↓压比
Al(NO ₃) ₃	0.001~0.1	施主杂质, 增大ZnO电导率	↑α, ↑I _{ci} , ↓压比

注 I_{ci}—电阻片的泄漏电流。

二、金属氧化物非线性电阻片的伏安特性

MOV的全伏安特性曲线如图2-2所示, 伏安特性可分三个典型区域。区域Ⅰ是低电场区(小电流区或预击穿区), 在此区域中, 其导电机理是在外加电场作用下, ZnO晶粒和晶界层的界面势垒降低, 热电子穿过势垒, 产生电流——肖特基(Schottky)效应。若以 $U = CI^a$ 表示伏安关系(C 为常数, 与MOV尺寸和特性有关; a 为MOV的非线性系数)。 a 较大, 约为0.2, 故伏安特性曲线陡峭, 电压变化对电流的影响较小。区域Ⅱ是中电场区

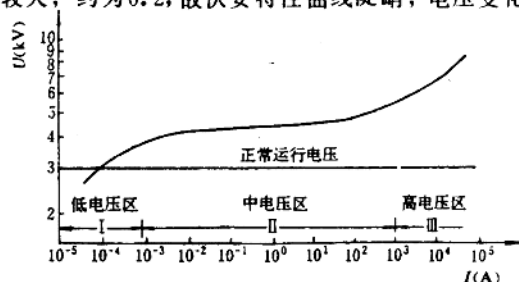


图 2-2 MOV的全伏安特性曲线

(工作电流区或击穿区), 此区域中的导电机理是隧道效应(场致发射), 非线性系数 a 与低电场时相比, 大大减小, 在0.02~0.04之间, 晶界层的电阻率已进入低阻状态, 使电阻片在 $10^{-3} \sim 10^3$ A的宽广范围内有平坦的伏安特性, 呈现出理想的非线性关系。区域Ⅲ是高电场区(超工作电流区或

翻转区), 此区域中非线性系数又增大, $a \approx 0.1$, 非线性减弱, 伏安特性明显上翘。

MOV从小电流区过渡到工作电流区, 其过程有如一只与放电间隙串联的非线性电阻, 当达到击穿电压时, 间隙击穿, 电流很快增大, 故称相应于这个产生过渡的电压为MOV的动作电压。实际上这种过渡并不是在某一点上突变, 而是在伏安特性上很窄的一段内渐变的, 难以取定某一值为动作电压值。因此, 用在这过渡区内某一电流值定义为参考电流, MOV通过参考电流时两端的电压为其动作电压, 现动作电压这一术语大多数国家已由参考电压(U_{ref})取代。

参考电流值一般在 $1 \sim 10 \text{ mA}$ ，由厂家确定。由于MOV有不同尺寸，为了便于相互比较，有时用其电压梯度 E 与电流密度 J 的关系，即 $E-J$ 特性表示。

必须指出，图2-2的伏安特性是用不同电源取得的，这主要是由于实用上的方便。大致上是：在小电流区用稳态电流（直流或工频）确定；大电流区的数十安至 1 kA 范围内用操作冲击电流确定，数千安以上则用雷电冲击电流确定。

小电流区的伏安特性，在直流电压作用下，流过MOV仅有传导电流，而在交流工频电压作用下，则除传导电流之外，还有电容电流和有损极化电流。通常，在工频低电压 u_0 作用下，流过MOV的电流 i_0 主要是容性电流 i_c ，它比阻性电流 i_R 可大一个数量级，此时的电压、电流波形如图2-3所示。MOV交流伏安特性是以其阻性电流幅值确定的。图2-4

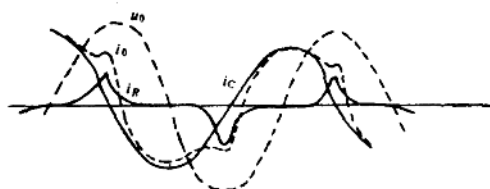


图 2-3 在工频低电压作用下MOV的电压、电流波形

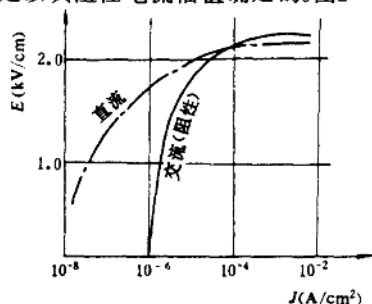


图 2-4 MOV的直流和交流 $E-J$ 特性

为同一MOV的交流及直流 $E-J$ 特性，两条特性线不重合，而相交于参考电压 U_{ref} 所对应的 E 值附近。在交点以下处于小电流区，直流传导电流数值甚小，可在交流电压作用下，除传导电流之外，还有极化过程中产生的传导电流，故交流 J_R 大于直流的 J_R ；在交点以上则将进入大电流区，传导电流值剧烈上升，极化电流已无可比拟，而此传导电流由于赶不上电压的交变，故交流电压下的阻性电流反而比直流电压下的低。

在小电流区域的电压梯度 E 与电流密度 J 关系尚受温度的明显影响，如图2-5所示，随温度增加，电阻减小，电流增大，呈现负的温度特性。顺便指出，在大电流区域，则略呈正的温度特性，如MOV通过 10 kA 时的端电压， 200°C 时较室温时约高 6% 。

MOV在长期持续电压的作用下，其伏安特性将会逐渐向右漂移，如图2-6所示，即在同样电压作用下，通过MOV的电流 I 随电压作用时间 t 之增长而上升，如图2-7所示。这

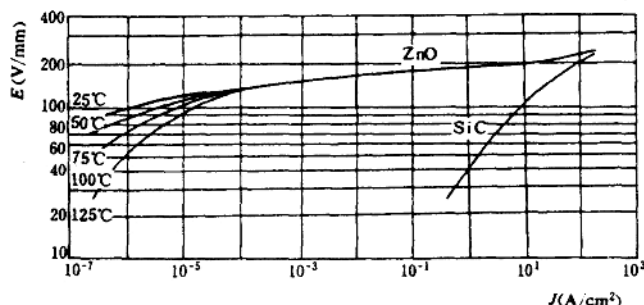


图 2-5 MOV的温度响应特性

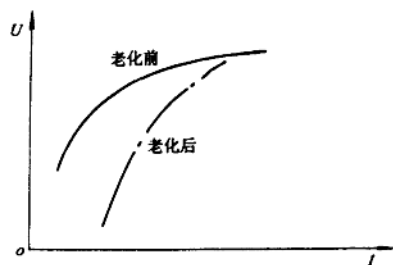


图 2-6 MOV 老化前后的伏安特性

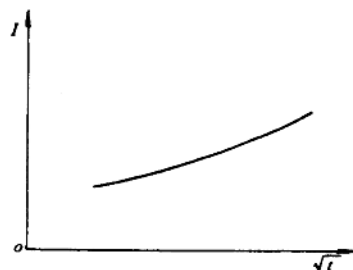


图 2-7 MOV 在长期持续电压作用下电流与时间的关系

将使MOA的损耗增大，对其运行不利，此现象称为MOV的老化。

这种老化的程度可用下式估算

$$J_d = J_0(E)(1 + h\sqrt{t})$$

$$h = h_0(E) \exp\left(\frac{-W_d}{kT}\right)$$

$$h_0(E) = H_0 E^n$$

式中， $J_0(E)$ 为在电压梯度 E 作用下流过MOV的起始传导电流密度； J_d 为在 E 作用下经时间 t 后流过MOV的传导电流密度； h 为MOV的老化率，它与 E 及温度有关； W_d 为MOV的老化激活能； k 为波尔茨曼常数； T 为绝对温度； H_0 、 n 为与MOV试品性能有关的常数，一般可取 $H_0 = 2.3 \times 10^{-6}$ ， $n = 2.6$ 。

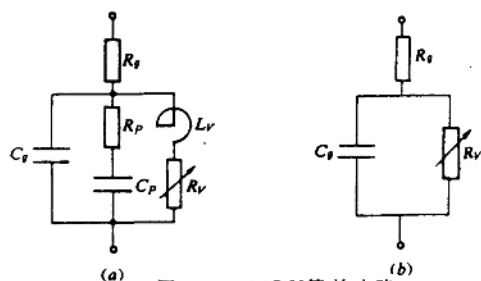


图 2-8 MOV 等效电路
(a) 等效电路；(b) 简化电路

由此可知，伏安特性的蠕变是外施电压和工作温度联合作用，导致MOV微观结构中晶界层的界面势垒降低，传导电流不断增大之故。当然，这种蠕变过程也与MOV的配方、工艺及晶相结构有关。在运行中，要严格限制长期作用的持续电压和工作温度的升高，以免加剧老化。

在应用MOV时，通常可用图2-8所示的等效电路。图中， C_s 等效MOV的固有电容，它与MOV的面积成正比，与MOV的厚度成

反比； R_s 等效ZnO晶粒电阻，它只在大电流时才呈现作用； C_p 和 R_p 等效有损极化过程； R_v 是非线性电阻，等效MOV的非线性； L_v 等效MOV的固有电感，反映端电压与作用波头的关系。图2-8(b)是其等效电路的简化电路。

第二节 氧化锌避雷器的基本工作原理及特点

氧化锌避雷器(MOA)是将相应数量的氧化锌电阻片(MOV)密封在瓷套或其他绝

缘体内而组成的。若因某些特殊需要，也可类似于传统的碳化硅电阻片避雷器(SCA)一样，采用串联间隙隔离工频电压。但一般都是充分利用MOV本身所具有的优异的非线性(阀性)，而不用串联间隙，制作成无间隙MOA。图2-9示意了无间隙MOA的伏安特性曲线。在选择MOA的参数时，要求电力系统最高运行相电压 U_{xg} 低于参考电压 U_{ref} ，并留有一定的差值。例如 U_{xg} 不大于图2-9中的持续运行电压 U_{cov} 值，对应于 U_{cov} 值时的电流仅有数百微安，MOV处于高阻状态。当系统中出现过电压 U_n 时，MOA将工作于大电流区，MOV呈现低阻状态，能有效地抑制过电压。

MOA是无串联间隙避雷器，它虽没有灭弧问题，但却有其独特的热稳定问题。

图2-10为MOA的热平衡曲线。图中曲线P为MOV发热功率曲线，因MOV在小电流区域内，电流随温度成指数上升，故曲线P亦按指数关系变化。曲线Q是MOA的散热曲线，它与MOA的结构有关，与温度 T 大致成线性关系，热量由MOV通过瓷套向大气散发，所以当MOV温度等于环境温度 T_{amb} 时，Q为零。曲线P、Q相交于A、B两点，即是MOA的两个热平衡状态。A点是稳定的热平衡点，当某种原因使温度略有波动时，热平衡都能自动回复到原来的A点。例如，温度上升 ΔT ，则曲线Q高于曲线P，散热大于发热，温度要下降，回至A点的温度 T_A ；温度下降 ΔT ，发热大于散热，温度回升至 T_A 。所以， T_A 为正常工作温度。B点是不稳定的平衡点，若温度上升 ΔT ，发热大于散热，温度更上升，最后达到MOV不能承受而损坏，这个过程称热崩溃；若温度下降 ΔT ，散热大于发热，经过一段时间，MOV还可回复到A点工作。因此，只有MOV受到大能量作用时才会工作在B点。B点温度 T_B 与 T_A 之差值($T_B - T_A$)称为MOV的极限温升，其值愈大则表示MOV的热稳定性能愈好，一般在100℃以上。

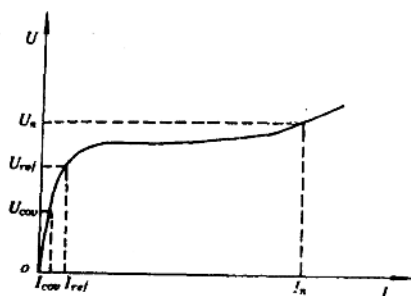


图 2-9 无间隙MOA的伏安特性

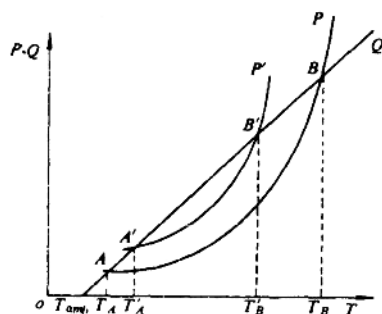


图 2-10 MOA的热平衡

MOV的老化，会使MOV发热曲线上移，如图2-10中曲线 P' ，此时正常工作温度 T_A' 大于 T_A ，从而更加速其老化。老化使MOV的极限温升($T_B' - T_A'$)明显减小，热稳定性能变化。老化的最终结果是在持续运行电压或过电压作用下，失去热稳定，因热崩溃使MOV损坏。

无间隙MOA与传统的有间隙SCA相比，MOA有其明显的特点。

1. 无续流及耐受重复动作的能力强

无间隙MOA在过电压作用后，可视为无续流通过MOA。MOV只吸收过电压能量，毋