



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GAO DIANYA JISHU

# 高电压技术

(第二版)

主 编 张 红  
副主编 陈 莅 林建军 姚金霞  
编 写 陈玉峰  
主 审 徐建政 陈立新



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书介绍了气体放电,液体、固体电介质的电气性能,电气设备的绝缘检测和诊断,高压试验设备及高电压的测量,线路和绕组中的波过程,雷电及防雷保护装置,输电线路的防雷保护,发电厂、变电站的防雷保护,电力系统内部过电压等基本内容。本书从基本物理概念及物理过程入手,同时也兼顾到现场应用实际,适当介绍了新技术、新方法。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业教学用书,也可作为从事相关工作的工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/张红主编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育  
ISBN 978-7-5083-8470-2

I. 高… II. 张… III. 高电压—技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第018294号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2006年11月第一版

2009年3月第二版 2009年3月北京第三次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.75印张 332千字

定价 21.00元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
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

高电压技术是电气技术领域通用性较强的学科,是电气工程及其自动化专业必修的专业课。本书在编写时充分考虑电气类专业人才培养的需要,从基本物理概念及物理过程入手,介绍电力系统中实用高电压技术的内容,对新技术做了适当介绍。

全书共分十章,第一、二章介绍各类电介质在电场作用下的基本电气特性;第三、四章介绍电气设备绝缘试验及状态检测;第五章介绍波过程;第六、七、八章介绍雷电过电压及其防护;第九章介绍电力系统内部过电压;第十章介绍电力系统绝缘配合。每章附有适量的习题,供学习者练习。

本书第一、五章由福建电力职业技术学院林建军编写,第六、七、八章由西安电力高等专科学校陈莅编写,第九章由山东电力高等专科学校姚金霞编写,第三章第五、七节由山东电力高等专科学校陈玉峰编写,其余章节由山东电力高等专科学校张红编写,全书由张红统稿并担任主编。

本书由山东大学徐建政教授担任主审。徐教授对全书进行了认真、仔细的审阅,提出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008年4月

## 目 录

## 前言

第一章 气 体 放 电	1
第一节 气体中带电质点的产生与消失	1
第二节 均匀电场中的放电过程	4
第三节 不均匀电场中的放电过程	10
第四节 不同电压形式下空气间隙的击穿特性	14
第五节 大气条件对空气间隙击穿电压的影响	21
第六节 提高气隙击穿电压的措施	23
第七节 沿面放电与污秽放电	25
第八节 $\text{SF}_6$ 气体的绝缘特性	32
小 结	34
习 题	34
第二章 液体、固体电介质的电气性能	36
第一节 电介质的极化、电导和损耗	36
第二节 液体电介质的击穿	45
第三节 固体电介质的击穿	50
第四节 电介质的老化	53
第五节 组合绝缘的击穿特性	54
小 结	56
习 题	56
第三章 电气设备绝缘的检测和诊断	57
第一节 绝缘电阻和吸收比的测量	57
第二节 直流泄漏电流的测量	60
第三节 介质损失角正切值的测量	61
第四节 局部放电的测量	65
第五节 绝缘油试验	69
第六节 耐压试验	76
第七节 绝缘的在线监测	77
小 结	86
习 题	86
第四章 高压试验设备及高电压的测量	87
第一节 稳态高压试验设备及其测量	87
第二节 冲击高压试验设备及其测量	93

小 结 .....	99
习 题 .....	99
<b>第五章 线路和绕组中的波过程</b> .....	100
第一节 均匀无损单导线线路中的波过程 .....	100
第二节 波的折射与反射 .....	104
第三节 波通过串联电感和并联电容 .....	106
第四节 波的多次折、反射 .....	108
第五节 无损平行多导线系统中的波过程 .....	111
第六节 波的衰减与变形 .....	113
第七节 绕组中的波过程 .....	114
小 结 .....	121
习 题 .....	122
<b>第六章 雷电及防雷保护装置</b> .....	123
第一节 雷电放电 .....	123
第二节 雷电参数 .....	124
第三节 避雷针和避雷线的保护范围 .....	127
第四节 避雷器 .....	130
第五节 接地装置 .....	140
小 结 .....	144
习 题 .....	144
<b>第七章 输电线路的防雷保护</b> .....	145
第一节 输电线路的感应雷过电压 .....	145
第二节 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平 .....	147
第三节 输电线路的雷击跳闸率 .....	152
第四节 输电线路的防雷保护措施 .....	153
小 结 .....	155
习 题 .....	156
<b>第八章 发电厂、变电站的防雷保护</b> .....	157
第一节 直击雷过电压的防护 .....	157
第二节 侵入波过电压的防护 .....	160
第三节 变电站的进线段保护 .....	165
第四节 变压器防雷保护的几个具体问题 .....	169
第五节 配电变压器的防雷保护 .....	171
第六节 气体绝缘变电站 (GIS) 的过电压保护 .....	171
第七节 旋转电机的防雷保护 .....	173
小 结 .....	177
习 题 .....	178

<b>第九章 电力系统内部过电压</b>	179
第一节 切除空载线路过电压	179
第二节 空载线路合闸过电压	181
第三节 切除空载变压器过电压	185
第四节 间歇电弧接地过电压	187
第五节 工频电压升高	189
第六节 谐振过电压	194
小 结	197
习 题	197
<b>第十章 电力系统绝缘配合</b>	198
第一节 绝缘配合的原则	198
第二节 绝缘配合的基本方法	199
第三节 电气设备绝缘水平的确定	201
第四节 架空输电线路绝缘水平的确定	202
小 结	206
习 题	206
<b>附录</b>	207
附录一 部分避雷器技术参数	207
附录二 球间隙击穿电压值	209
<b>参考文献</b>	212

## 第一章 气 体 放 电

在自然界中,气体放电是一种很普遍的自然现象,比如大气层中的闪电和极光;在日常生活中,利用气体放电原理制成的电光源器具也是琳琅满目,比如荧光灯、钠灯等;在电力工业中,气体放电更是一个经常要涉及和研究的课题。

电气设备通常都是由导体(conductor)和绝缘体(insulator)组成的。各种金属材料构成了设备的导电(有时是导磁)回路,各种绝缘材料(又称电介质)则将设备不同电位的导体之间及与大地可靠地隔离。大量的事实表明,绝缘体是电气设备中的关键部分,同时也是比较薄弱的部分,其性能优劣将决定着设备及系统能否安全、可靠地运行。绝大多数的电力系统故障就是由于绝缘遭到破坏后引起的。因此,很有必要研究各类电介质在高电压作用下的电气特性。

电介质就其形态而言,可分为气体电介质、液体电介质和固体电介质。其中对气体电介质放电特性的研究相对比较深入完整,此外气体放电理论也是液体、固体介质放电理论的基础。所以,本书首先介绍气体电介质的放电理论。

气体电介质,尤其是空气介质在电力系统中的应用非常广泛,例如几乎所有的高压输电线路(除了电力电缆)、隔离开关的断口等都是利用空气作为绝缘的。由物理知识知道,在正常情况下空气是“不导电”的,即为通常所说的绝缘体。实际上,受各种宇宙射线的作用,正常时空气中含有少量的带电质点,但数量极低,故无法构成导电通道。但是,如果对空气间隙外加某一临界电压时,间隙中的电流会突然剧增,同时出现明显的发光、发热现象,空气间隙会突然失去绝缘性能而变成导电通道,我们把这种现象称为气体放电。

实际上,气体放电存在两种形式——击穿(breakdown)与闪络(flashover),前者是指纯间隙的放电(将在本章第一节到第六节里介绍),后者是指沿着固体表面的气体放电(将在本章第七节里介绍)。击穿与闪络统称为放电(discharge)。

气体放电后只会引起绝缘的暂时丧失,一旦放电结束后,又可自行恢复其绝缘性能,所以气体绝缘是一种自恢复绝缘。

空气是取之不尽用之不竭的,是一种最廉价的绝缘材料。工程上通常采用空气介质作为电气设备的外绝缘(设备外壳外部的绝缘)和架空线路的绝缘。在气体电介质中,除了空气外,工程上还大量采用六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体作为绝缘介质(本章第八节介绍), $\text{SF}_6$ 气体通常作为电气设备的内绝缘(设备外壳内部的绝缘)。

### 第一节 气体中带电质点的产生与消失

#### 一、气体中带电质点的产生

气体原子在外界因素的作用下,吸收外界能量使其内部能量增加,这时气体原子核外的电子将从离原子核较近的轨道跳到离原子核较远的轨道上去,此过程称为原子的激励。原子的激励状态是不稳定状态,经过极短的时间就会回复到正常状态,激励原子回到正常状态时

将以光的形式放出能量。

如果中性原子由外界获得足够的能量,以致使原子中的一个或几个电子完全脱离原子核的束缚而成为自由电子和正离子(即带电质点),此过程称为原子的游离。游离是激励的极限状态,气体分子或原子游离所需要的能量称为游离能,游离能随气体种类而不同,一般约在  $10 \sim 15 \text{eV}$  之间。

这就是说,气体中的带电质点是通过游离产生的。按照外界能量来源的不同,通常把游离分为以下几种形式。

### 1. 碰撞游离

处于电场中的带电质点,在电场  $E$  的作用下,沿电场方向不断得到加速并积累动能。当具有的动能积累到一定数值后,在其与气体原子或分子发生碰撞时,可以使后者产生游离。由碰撞而引起的游离称为碰撞游离。

电子、离子、中性质点与中性原子或分子的碰撞,以及激发原子与激发原子的碰撞都能产生游离。在气体放电过程中,碰撞游离主要是由自由电子与气体原子或分子相撞而引起的,而离子或其他质点因其本身的体积和质量较大,难以在碰撞前积累起足够的能量,产生碰撞游离的可能性是很小的,因此电子在碰撞游离中起着极其重要的作用。

产生碰撞游离的必要条件是

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (1-1)$$

式中  $m$  ——电子的质量;

$v$  ——电子的运动速度;

$W_i$  ——气体原子或分子的游离能。

质点两次碰撞之间的距离称为自由行程。由于每两次碰撞间的自由行程长短不一,具有统计性,所以我们引入平均自由行程  $\bar{\lambda}$  的概念,将  $\bar{\lambda}$  定义为质点自由行程的平均值。显然,  $\bar{\lambda}$  与气体间的压力  $p$  成反比,与绝对温度  $T$  成正比。一般情况下,  $\bar{\lambda}$  越大,就越容易发生碰撞游离。

通过碰撞,能使中性原子或分子发生游离的电子称为有效电子。

### 2. 光游离

当原子中的电子从高能级返回到低能级时,多余的能量以光子的形式释放出来;相反的过程是,原子也可以吸收光子的能量来提高它的位能。和电子碰撞一样,若光子的能量  $h\nu$  大于或等于原子或分子的游离能,即

$$h\nu \geq W_i \quad (1-2)$$

式中  $h$  ——普朗克常数,其值为  $4.15 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$ ;

$\nu$  ——光的频率。

则可使原子或分子游离。与电子碰撞不同的是,在碰撞后,光子把能量传给原子或分子,而自身便不再存在了。这种由于光辐射引起原子或分子游离的现象称为光游离。

产生光游离的能力决定于光的波长,波长越短,光子的能量越大,游离能力就越强。所以,通常可见光是不能直接产生光游离的,只有各种短波长的高能辐射线,例如宇宙射线,短波长的紫外线、 $\gamma$ 射线、X射线等才有使气体产生光游离的能力。

在气体放电过程中,当处于激励状态的原子回到常态,以及异号带电质点复合时,都以

光子的形式放出多余的能量，成为导致产生光游离的因素。

由光游离产生的自由电子称为光电子。

### 3. 热游离

气体在热状态下引起的游离过程称为热游离。

常温下，气体质点的热运动所具有的平均动能远低于气体的游离能，因此不可能产生热游离。但在高温下的气体，例如发生电弧放电时，弧柱的温度可高达数千℃以上，这时气体质点的动能就足以导致气体分子或原子碰撞时产生游离。此外，高温气体的热辐射也能导致气体分子或原子产生光游离。故热游离实质上并不是另外一种独立的游离形式，而是在热状态下产生碰撞游离和光游离的综合。

热游离的基本条件是

$$\frac{3}{2}KT \geq W_i \quad (1-3)$$

式中  $K$ ——波尔茨曼常数，其值为  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ；

$T$ ——热力学温度，K。

### 4. 表面游离

以上讨论的是气体在气隙空间里带电质点的产生过程（称为空间游离）。实际上，在气体放电中还存在着金属表面发射电子的过程，称为金属电极表面游离。

使金属表面发射电子所需要的能量称为逸出功。逸出功与金属的微观结构及其表面状态有关，一般在  $10\text{eV}$  以内。可见，金属表面发射电子要比在空间使气体分子游离容易得多。

用各种不同的方式供给金属电极能量，如对阴极加热（热电子发射）、正离子撞击阴极、短波光照射电极（光电效应）以及强电场作用（强场发射）等，都可以使阴极表面发射电子。

## 二、气体中带电质点的消失

当气体中发生放电时，除了有不断产生带电质点的游离过程外，同时还存在一个相反的过程，即去游离过程，它将使带电质点从游离区消失，或者削弱产生游离的作用。气体去游离的基本形式有如下几种。

### 1. 漂移

带电质点在外电场作用下作定向运动，消逝于电极面形成回路电流，从而减少了气体中的带电质点（称为漂移）。由于电子的漂移速度比离子快得多，故放电电流主要是电子漂移运动的结果。电流的大小取决于带电质点的浓度及其在电场方向的平均速度。

### 2. 扩散

气体中带电质点的扩散是由热运动造成的，故它与气体的状态有关。气体的压力越高或温度越低，扩散过程也就越弱。电子的质量远小于离子，所以电子的热运动速度很大，它在热运动过程中所受到的碰撞机会也较少，因此，电子的扩散作用比离子要强得多。

### 3. 复合

气体中异号电荷的粒子相遇时，有可能发生电荷的传递而相互中和，从而使气体中的带电质点减少。复合速度跟异号电荷的浓度、相对速度有关。异号电荷的浓度愈大，复合的过程也愈快速、愈强烈，故强烈的游离区也是强烈的复合区。异号电荷的相对速度愈小，相互作用的时间就愈长，复合的可能性也就愈大。气体中电子的运动速度比离子要大得多，故

正、负离子间的复合要比正离子和电子间的复合容易发生得多。

但需指出,带电质点的复合过程中会发生光辐射,这种光辐射在一定条件下又会导致其他气体分子游离,从而使气体放电呈现出跳跃式的发展。

#### 4. 吸附效应

绝大多数的电子与气体原子或分子碰撞时,可能发生碰撞游离而产生电子和正离子,使得气体中自由电子的数量大增。但是,有些电子和气体原子或分子碰撞时,非但没有游离出新电子,碰撞电子反而被气体分子吸附而形成了负离子,这种现象称为吸附效应。容易吸附电子形成负离子的气体称为电负性气体,如氧、氯、氟、水蒸气和六氟化硫气体等。

如前所述,离子的游离能力远不如电子。吸附效应能有效地减少气体中的自由电子数量,从而对碰撞游离中最活跃的电子起到强烈的束缚作用,大大抑制了放电的发展,因此也将吸附效应看作是一种去游离的因素。

气体中游离与去游离这对矛盾的发展过程将决定气体的状态。当游离因素大于去游离因素时,最终导致气体击穿;相反,当去游离因素大于游离因素时,最终使气体放电过程消失并恢复为绝缘状态。

## 第二节 均匀电场中的放电过程

气体放电理论的研究,首先就是从均匀电场开始的。所谓均匀电场,就是在电场中,电场强度处处相等,如两个平行平板电极的电场(当然还要考虑边缘效应),如图1-1所示。

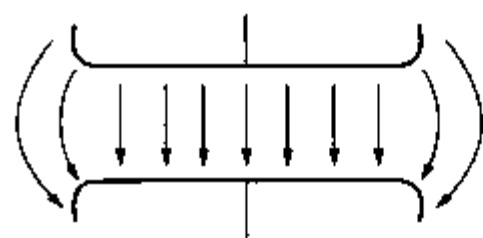


图 1-1 平行平板电极的电场

### 一、气体放电过程的一般描述

实际上,无论是均匀电场还是后面将要介绍的不均匀电场,它们的一般放电过程是类似的,那就是随着外施电压的增加,放电都是逐渐发展的,都是由非自持放电转入自持放电的。

#### 1. 自持放电与非自持放电

如图1-2所示,在外界光源照射下,对两平行平板电极(极间的电场是均匀的,极间的介质为空气)间施加一可调的直流电压,当电压从零逐渐升高时,可以得到气体中的电流  $I$  与所加电压  $U$  之间的关系,即气体的伏安特性曲线,如图1-3所示。

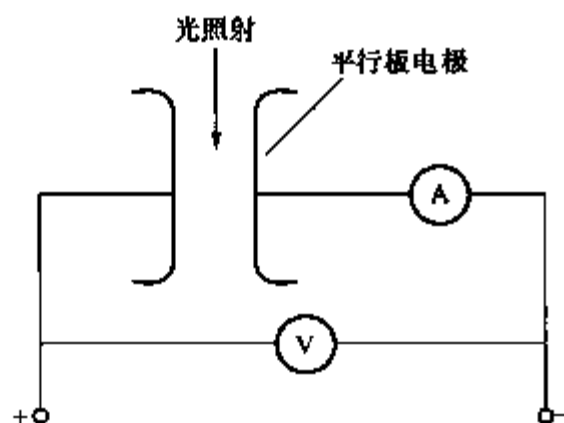


图 1-2 实验原理接线图

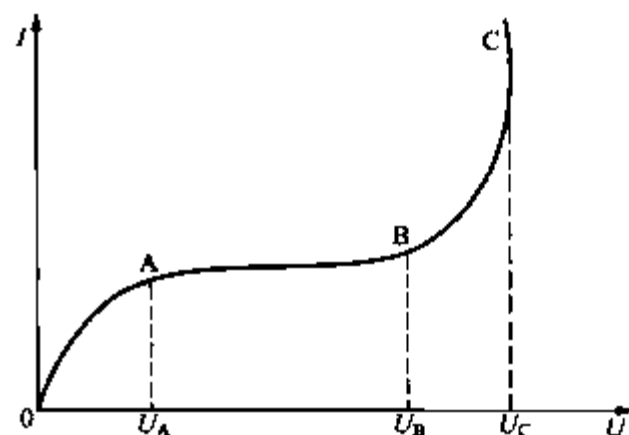


图 1-3 气体间隙放电时的伏安特性曲线

线性段  $OA$ 。随着电压的升高,带电质点的运动速度加大,间隙中的电流也随之近乎成比例增大。

饱和段 AB。到达 A 点后, 电流不再随电压的增大而增大, 因为这时在单位时间内所有由外界游离因素产生的有限带电质点已全部参与了导电, 故电流趋于饱和。饱和段的电流密度仍然是极小的, 一般只有  $10^{-19} \text{ A/cm}^2$  的数量级, 因此此时气隙仍处于良好的绝缘状态。

碰撞游离段 BC。进一步增大电压以后, 间隙中的电流又随外加电压的增加而增大, 如曲线的 BC 段。因为这时电子在足够强的电场作用下, 已积累起足以引起碰撞游离的动能, 使得间隙中的带电质点骤增。

自持放电段 (C 点以后)。当电压继续升高至某临界值  $U_0$  以后, 电流急剧突增, 同时伴随着产生明显的外部特征, 如发光、发声等现象。此时气体间隙突然变为良好的导电状态。

实验表明, 当外加电压小于  $U_0$  时, 间隙电流极小, 气体本身的绝缘性能尚未被破坏。此时若去掉外界游离因素, 电流也将消失, 我们把这类放电称为非自持放电。当外加电压达到  $U_0$  后, 气体中的游离过程仅仅依靠外电场的作用即可自行维持, 而不再需要外游离因素, 我们把这类放电称为自持放电。曲线上 C 点就是非自持放电和自持放电的分界点, 把由非自持放电转为自持放电的临界电压  $U_0$  称为起始放电电压, 其对应的电场就称为起始放电场强  $E_0$ 。

游离放电的进一步发展以至气隙击穿的最后过程, 将随气隙中电场型式不同而不同。

在均匀电场中, 由于各处的场强相等, 只要任意一处开始出现自持放电, 就意味着整个间隙将被完全击穿, 故均匀电场中的起始放电电压就等于间隙的击穿电压。实验表明, 在标准大气条件下, 均匀电场中空气间隙的击穿场强 (也称为气体的电气强度) 约为  $30 \text{ kV (峰值) /cm}$ 。

在不均匀电场中, 由于各处的场强差异悬殊, 当放电由非自持转入自持放电时, 仅仅是在高场强的局部区域出现自持放电 (电晕放电), 而广大弱电场区域还是良好的绝缘体, 故欲使整个间隙击穿还需继续升高电压。也就是说, 在不均匀电场中, 击穿电压可能比起始放电电压高得多。

## 2. 气体放电后的形式

气体放电后, 根据电源容量、气体压力、电极形状的不同, 将具有不同的放电外形。在电源容量很小, 气体压力较低时, 表现为充满整个间隙的辉光放电; 在电源容量不大, 较大的气压时, 常表现为跳跃性的火花放电; 在电源容量较大且内阻较小时, 就可能出现电流大、温度高的电弧放电; 在电极的曲率半径较小时, 会在该电极附近出现淡淡发光薄层的电晕放电; 由电晕电极伸出的明亮而细的断续放电通道, 则称为刷状放电。

## 二、气体放电理论

如前所述, 进入自持放电以后, 即使去掉外游离因素, 放电也能够依靠自身而得以维持。为了解释这一现象, 下面介绍汤逊气体放电理论与流注放电理论。

### 1. 汤逊理论

(1) 电子崩及  $\alpha$  过程。在外游离因素作用下, 间隙中产生自由电子, 这些起始电子在较强外电场的作用下加速, 造成碰撞游离而产生新的电子。新电子和原有的电子一起又将从电场获得动能, 继续引起碰撞游离。这样, 就出现了一个迅猛发展的碰撞游离, 使间隙中的带电质点数量剧增, 如同雪崩状, 这一现象称为电子崩。图 1-4 所示为电子崩发展的示意图, 但此时的放电仍属

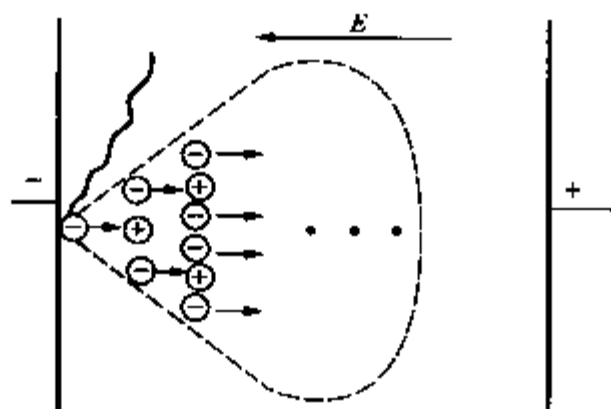


图 1-4 产生电子崩的示意图

非自持放电。

电子崩的发展过程也称为  $\alpha$  过程。 $\alpha$  称为电子碰撞游离系数, 它表示一个电子沿着电场方向行进的过程中, 在单位距离内平均发生碰撞游离的次数, 亦称为汤逊第一游离系数。 $\alpha$  值与气体的种类、气体的相对密度和电场强度有关。根据实验和理论推导可得

$$\alpha = A\delta e^{-\frac{B}{E}} \quad (1-4)$$

式中  $A$ 、 $B$  ——与气体性质有关的常数;

$\delta$  ——空气相对密度,  $\delta = K \frac{P}{T}$ ;

$E$  ——电场强度。

如图 1-5 所示, 设在外界游离因素的作用下, 阴极由于光电子发射产生  $n_0$  个电子, 在电场作用下, 这  $n_0$  个电子在向阳极运动的过程中不断产生碰撞游离, 行经距离  $x$  时变成了  $n$  个电子, 再行经  $dx$  距离, 增加的电子数为  $dn$  个, 则

$$dn = n\alpha dx$$

对上式积分, 可求得  $n_0$  个电子在电场作用下不断产生碰撞游离, 发展电子崩, 经距离  $d$  而进入阳极的电子数

$$n = n_0 e^{\int_0^d \alpha dx}$$

图 1-5 均匀电场中电子崩电子数的计算

当气体状态保持一定、且电场均匀时,  $\alpha$  为常数, 上式变为

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 就是电子崩发展的规律。

(2)  $\beta$  过程。除了  $\alpha$  过程, 气隙空间中还存在着  $\beta$  过程。一个正离子沿电场方向行进的过程中, 在单位距离内平均发生碰撞游离的次数称为正离子碰撞游离系数, 记为  $\beta$ , 亦称为汤逊第二游离系数。由于正离子质量大、体积大, 平均自由行程短, 所以在运动中不易积累起引起碰撞游离的能量, 因而  $\beta$  值极小, 在分析时可予忽略。

(3)  $\gamma$  过程及汤逊自持放电条件。 $\alpha$  过程仅讨论了电极空间的碰撞游离, 实际上正离子及光子在阴极表面均可激发出电子而引起阴极表面游离, 称为  $\gamma$  过程。为此引入正离子的表面游离系数  $\gamma$ , 它表示一个正离子在电场作用下由阳极向阴极运动, 撞击阴极表面产生表面游离的电子数, 亦称为汤逊第三游离系数。在式 (1-5) 中, 令  $n_0=1$ , 则

$$n_d = e^{\alpha d}$$

即一个电子从阴极出发运动到阳极时, 由于碰撞游离形成电子崩, 到达阳极时将变成  $e^{\alpha d}$  个电子 (包括起始的一个电子)。如果除去起始的一个电子, 那么产生的新电子数或正离子数为  $(e^{\alpha d} - 1)$  个。这些正离子在电场的作用下向阴极运动, 并撞击阴极表面, 如果  $(e^{\alpha d} - 1)$  个正离子在撞击阴极表面时, 至少能从阴极表面释放出一个有效电子来弥补原来那个产生电子崩并已进入阳极的电子, 使后继电子崩无需依靠其他外界游离因素而仅依靠放电过程本身就能自行得到发展。所以汤逊理论的自持放电条件可表达为

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1-6)$$

(4) 巴申定律。其实早在汤逊理论出现之前, 科学家巴申就于 19 世纪末对气体放电进行了大量的实验研究, 并对均匀电场中的气体放电做出了放电电压与放电距离  $d$  和气压  $p$

的乘积的关系曲线, 即  $U_b = f(pd)$ , 如图 1-6 所示。从图中可以看出, 曲线呈 U 型, 分为左右两半支, 并在某  $pd$  值时曲线有极小值。不同的气体, 其最低击穿电压  $U_{b,min}$ , 以及对应的  $pd$  值各不相同。对空气,  $U_b$  的极小值约为 325V。

假设  $d$  保持不变, 改变  $p$ 。 $p$  增大时, 虽然电子容易与气体粒子碰撞, 但平均自由行程  $\bar{\lambda}$  将缩短, 每次碰撞时由于电子积聚的动能难以使气体粒子游离, 故  $U_b$  升高; 反之, 当  $p$  过分减小时, 虽然  $\bar{\lambda}$  增大, 每次碰撞时积聚的动能易引起气体粒子游离, 但电子不易与气体粒子相碰撞, 碰撞的机会大大减少, 故  $U_b$  也会增大。

假设  $p$  保持不变, 改变  $d$ 。 $d$  增大时, 欲得到一定的电场强度, 外加电压就必须增大; 反之, 当  $d$  减少时, 电场强度增大, 但电子在走完全程中所发生的碰撞次数减小, 甚至  $\bar{\lambda}$  可与  $d$  相比较, 因此电子遇不到气体分子就带着很大的动能直接撞进阳极去了。故  $U_b$  也会增大。

根据汤逊理论, 也可得出上述的函数关系  $U_b = f(pd)$ 。因此, 巴申定律可从理论上由汤逊理论得到佐证, 同时也给汤逊理论以实验结果的支持。以上分析都是在假定气体温度不变的情况下做出的。为了考虑温度变化的影响, 巴申定律更普遍的形式是以气体的密度代替压力。对空气而言, 可用  $U_b = f(\delta d)$  表示, 其中  $\delta$  为空气的相对密度, 即实际的空气密度与标准大气条件下的密度之比, 详见式 (1-15)。

(5) 适用范围及局限性。汤逊放电理论可较好地解释低气压、短间隙、均匀电场中的放电现象,  $\delta d$  过小或过大时, 放电机理将出现变化, 汤逊理论就不适用了。比如在  $pd$  过小时, 场致发射 (即金属表面发生强场发射) 将导致击穿。而在解释大气中长间隙 (即  $pd$  较大) 放电过程时, 发现有以下几点实验现象无法全部在汤逊理论范围内给予解释:

①放电时间。根据汤逊放电理论计算出来的击穿过程所需的时间, 至少应等于正离子走过极间距离的时间, 而实测的放电时间要比此值小 10~100 倍。

②阴极材料的影响。根据汤逊放电理论, 阴极材料在击穿过程中起着重要的作用, 然而实验表明, 气体在大气压下, 间隙的击穿电压与阴极材料无关。

③放电外形。按汤逊放电理论, 气体放电应在整个间隙中均匀连续地发展。低气压下的气体放电区确实占据了整个电极空间, 如放电管中的辉光放电。但在大气中气体击穿时会出现有分支的明亮细通道。

通常认为,  $\delta d > 0.26\text{cm}$  (或  $pd > 200 \times \frac{101.3}{760} \text{kPa} \cdot \text{cm}$ ) 时, 击穿过程将发生变化, 汤逊理论的计算结果不再适用, 但其所描述的气体放电的基本物理过程却具有普遍意义。

## 2. 流注理论

汤逊理论是用  $\alpha$  过程及  $\gamma$  过程来说明  $\delta d$  较小时的放电现象, 但当  $pd$  较大时, 如前所述放电过程及现象出现了新的变化。于是在汤逊理论的基础上, 由洛伊布 (Leob) 和米克 (Meek) 等通过大量的实验研究及对雷电的观测, 提出了流注放电理论。流注理论认为电子

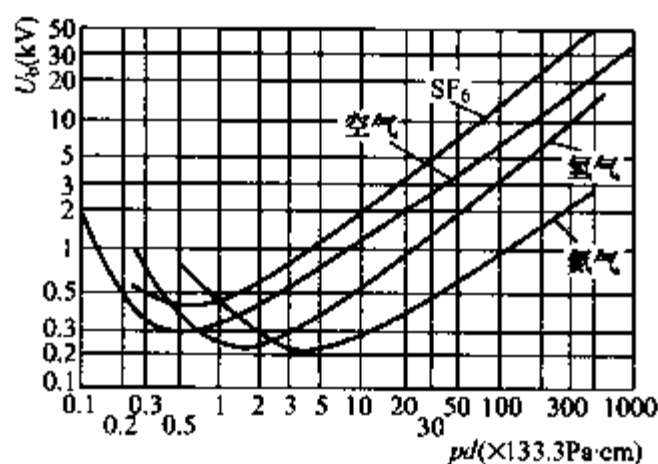


图 1-6 均匀电场中几种气体的击穿电压  $U_b$  与  $pd$  的关系曲线

的碰撞游离和空间光游离是形成自持放电的主要因素, 并且强调了空间电荷畸变电场的作用。但流注理论还很粗糙, 目前只能做定性的描述。

(1) 空间电荷对电场的畸变作用。当外电场足够强时, 一个由外界游离因素产生的初始电子, 在从阴极向阳极运动的过程中产生碰撞游离而发展成为电子崩, 这种电子崩称为初始电子崩, 简称为初崩或主崩。由于电子的迁移速度远大于正离子, 故绝大多数电子都集中在电子崩的头部, 而正离子则基本上滞留在原来产生它的位置上, 因而在电子崩头部集中着大部分的正离子和几乎全部的电子。由于电子崩在发展过程中带电质点的不断扩散, 所以半径也会逐渐增大。如图 1-7 (a) 所示。

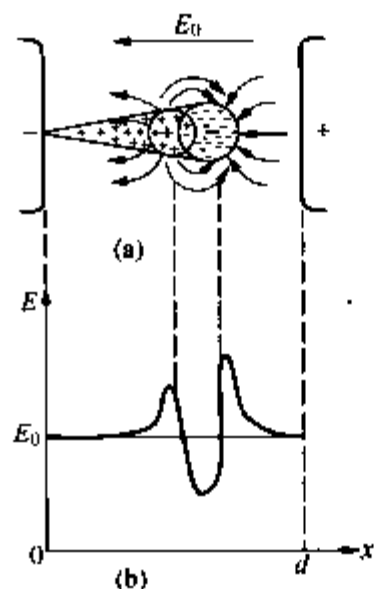


图 1-7 电子崩中的  
空间电荷对均匀  
电场的畸变

当电子崩发展到一定程度后, 电子崩形成的空间电荷的电场将大为增强, 使总的合成电场明显发生畸变, 其结果是增强了崩头及崩尾的电场, 而削弱了电子崩内正负电荷区域之间的电场。如图 1-7 (b) 所示。电子崩头部电荷密度非常大, 游离过程强烈, 再加上电场分布受到上述的畸变, 结果崩头将放射出大量光子。崩头前后, 电场明显增强, 这有利于产生分子和离子的激励现象, 当分子和离子从激励状态恢复到正常状态时, 放射出光子。而崩中间区域的电场较弱, 这有利于带电质点的复合和被激励分子回到原始状态, 同样也将有光子辐射。当外电场相对较弱时, 这些过程不很强烈, 不会引起什么新的现象。但当外电场足够强, 情况就引起了质的变化, 电子崩头部开始形成流注。

(2) 流注的形成。当外加电压等于击穿电压, 初崩发展到阳极时, 如图 1-8 (a) 所示, 初崩中的电子迅速消失于阳极中, 留下来的大量正离子 (在初崩头部密度最大) 使尾部的电场大大增强, 并向周围放射出大量的光子。这些光子在附近的气体中引起了光游离, 于是在空间产生光电子, 如图 1-8 (b) 所示。

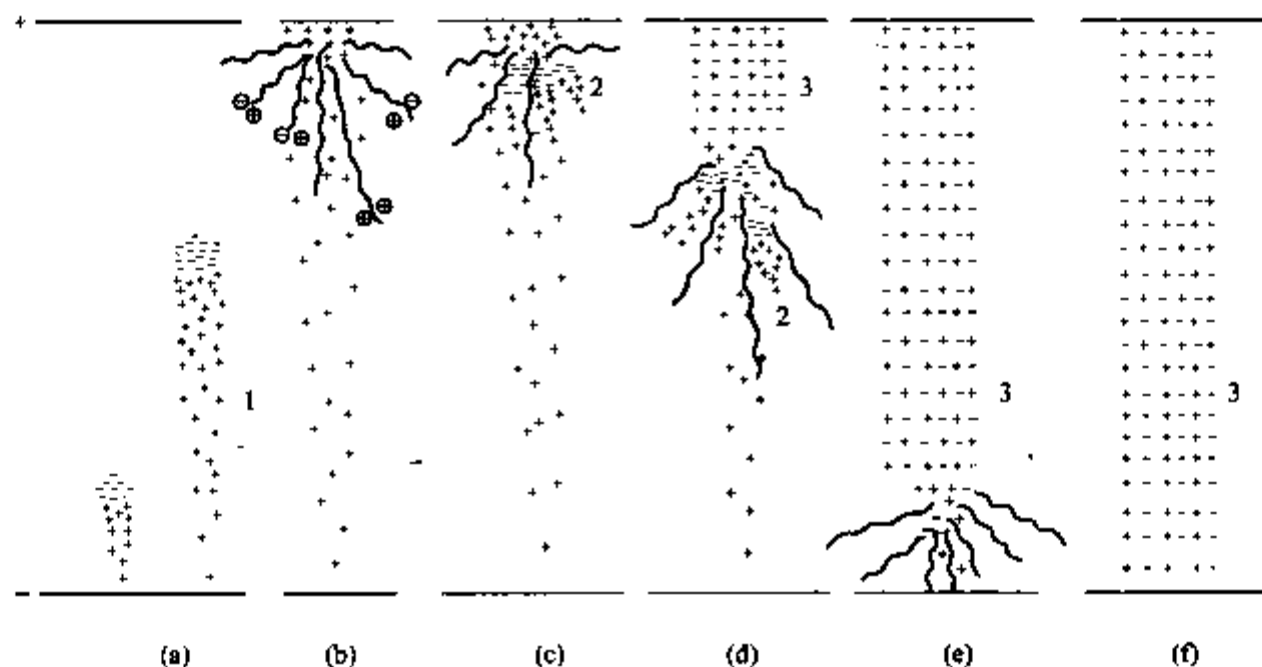


图 1-8 正流注的产生及发展

1—主电子崩; 2—二次电子崩; 3—流注

新形成的光电子被主崩头部的正空间电荷吸引, 在受到畸变而加强了的电场中, 又激烈

地造成了新的电子崩，称为二次电子崩，简称二次崩。如图 1-8 (c) 所示。

二次崩头部的电子被主崩头部的正空间电荷吸引进入主崩头部区域，由于这里电场强度很小，所以电子大多形成负离子。大量的正负离子汇合后形成的混合通道，称为流注。如图 1-8 (d)、(e)、(f) 所示。

流注通道导电性良好，其头部（这里流注的发展方向是从阳极到阴极，称为正流注，它与初崩发展方向相反）又是由二次崩形成的正电荷，使得流注头部前方出现更强的电场，同时，由于很多二次崩汇集的结果，流注头部游离过程蓬勃发展，向周围放射出大量光子，继续引起空间光游离。于是在流注前方出现了新的二次崩，它们被吸引到流注头部，从而延长了流注通道。如图 1-8 (e) 所示。

这样，流注不断向阴极推进，且随着流注向阴极的接近，其头部电场越来越强，因而其发展速度越来越快。当流注发展到阴极后，整个间隙被导电性能良好的等离子通道所贯通，就将导致整个间隙的击穿，如图 1-8 (f) 所示。

由于流注理论较为抽象，为了帮助读者理解，下面用一流程图来大致描述上述的流注形成过程：外电场足够强时，初始电子加速→形成电子崩（初崩）→空间出现大量电荷→外电场分布被畸变→崩头、崩尾电场增强（使游离更强烈），崩内电场削弱（使复合更容易）→向空间辐射大量光子→空间光游离→产生光电子→外电场作用及初崩正离子吸引→形成电子崩（二次崩）→与初崩汇合形成正负离子混合通道→形成流注→流注的导电性很好，促使流注迅速向前方发展→……→流注贯穿两电极→气隙绝缘破坏，即击穿。

应当指出的是，以上介绍的是电压较低，电子崩经过整个间隙方能形成流注的情况，由于这种流注由阳极向阴极发展，故称为正流注。如果外加电压比击穿电压高时，则电子崩无须跑完整个间隙，其头部的电子数即可达到足够的数量，足以形成流注。由于这种流注由阴极向阳极发展，故称为负流注。负流注的发展过程中，电子的运动受到电子崩留下的正电荷的牵制，故发展速度较正流注的要小。

(3) 流注自持放电条件。从上面的分析可知，流注的形成需要初崩头部的电荷达到一定的数量，使电场发生足够的畸变和加强，并造成足够的空间光游离。

一般认为，当  $\alpha d \approx 20$ （或  $e^{\alpha d} \approx 10^8$ ）时便可满足上述条件，使流注得以形成。而一旦形成流注，放电即可转入自持，在均匀电场中即导致气隙的击穿。

(4) 流注理论对放电现象的解释、适用范围及局限性。流注理论可以解释汤逊理论不能说明的大气中的放电现象。在大气中，放电发展之所以迅速，其原因在于多个不同位置的电子崩同时发展和汇合，这些二次崩的起始电子是由光子形成的，光子的运动速度比电子大得多，且它又处在加强的电场中前进，其速度比初始电子崩快，故流注的发展速度极快，使大气中的放电时间特别短；另外，流注通道中的电荷密度很大，电导很大，故其中的电场强度很小，因此，流注出现后，将减弱其周围空间内电场，但加强了流注前方的电场，并且这一作用将伴随着其向前发展而更为增强。故电子崩形成流注后，当由于偶然原因使某一流注发展较快时，它将抑制其他流注的形成和发展。这种作用随流注向前推进越来越强，使流注头部始终保持着很小的半径，因此整个放电通道是狭窄的，而且二次崩可以从流注四周不同的方位同时向流注头部汇合，故流注的头部推进可能有曲折和分支。再则在大气条件下，放电的发展不是靠正离子撞击阴极使阴极产生二次电子来维持，而是靠空间光游离产生光电子来维持，故大气中气隙的击穿电压与阴极材料基本无关。

一般认为当  $\delta d > 0.26 \text{ cm}$  (或  $pd > 200 \times \frac{101.3}{760} \text{ kPa} \cdot \text{cm}$ ) 时, 放电就由汤逊形式过渡到流注形式。故流注理论适用于解释长间隙、大气压, 即  $pd$  较大时的情况。但是流注理论也无法很好地解释短间隙、低气压时的气体放电现象。因此, 汤逊理论与流注理论互相补充, 从而在广阔的  $\delta d$  范围内说明了不同的放电现象。

### 第三节 不均匀电场中的放电过程

在电力工程的大多数实际绝缘结构中, 电场都是不均匀的。所谓不均匀电场, 就是电场各处的电场强度不相等。如棒—棒间隙、棒—板间隙等, 如图 1-9 所示。

为了能够定量分析电场的均匀程度, 通常可用电场不均匀系数  $f$  来描述

$$f = \frac{E_{\max}}{E_{\text{av}}}$$

其中,  $E_{\max}$  为最大场强,  $E_{\text{av}}$  为平均场强。

$$E_{\text{av}} = \frac{U}{d}$$

其中,  $U$  为间隙上外加的电压,  $d$  为间隙的最小距离。

一般地, 对均匀电场  $f=1$ , 对稍不均匀电场  $1 < f < 2$ , 对极不均匀电场  $f > 4$ 。严格来说, 均匀电场在工程中是无法见到的。工程上所使用的平行板电极一般都是采用了消除电极边缘效应的措施 (比如高压静电电压表)。

典型的稍不均匀电场实例是高电压试验中使用的球间隙以及 SF<sub>6</sub> 封闭式组合电器 (GIS) 中的分相母线圆筒等, 而高压输电线之间的空气绝缘则是极不均匀电场。

稍不均匀电场中放电的特点与均匀电场中相似, 在间隙击穿前看不到有什么放电的迹象。而极不均匀电场 (以下指的不均匀电场就是指极不均匀电场) 中空气间隙的放电具有一系列的特点, 因此, 研究不均匀电场中气体放电的规律具有更大的实际意义。

#### 一、电晕放电

##### 1. 电晕放电现象

在极不均匀电场中, 间隙中的最大场强与平均场强相差很大, 以至当外加电压及其平均场强还较低的时候, 曲率半径较小电极附近空间的局部场强已很大, 在这局部强场区的空气会首先发生自持放电, 称为电晕放电。

发生电晕放电时, 曲率半径较小的电极附近会出现淡蓝色的发光层, 同时伴随轻微的“滋滋”的响声, 严重时还可嗅到臭氧的气味。

##### 2. 电晕的起始电压与起始场强

开始出现电晕时的电压称为电晕起始电压, 此时电极表面的场强称为电晕起始场强。

实际电气设备的绝缘结构比较复杂, 电极形状与表面状态及各种因素的影响相差很大, 准确计算电晕起始电压十分困难, 因此工程上一般采用皮克 (F. W. Peek) 经验公式来计算电晕起始场强与起始电压。

比如, 对于同直径的两根平行输电线路, 其电晕起始场强  $E_c$  (导线的表面场强, 峰值)

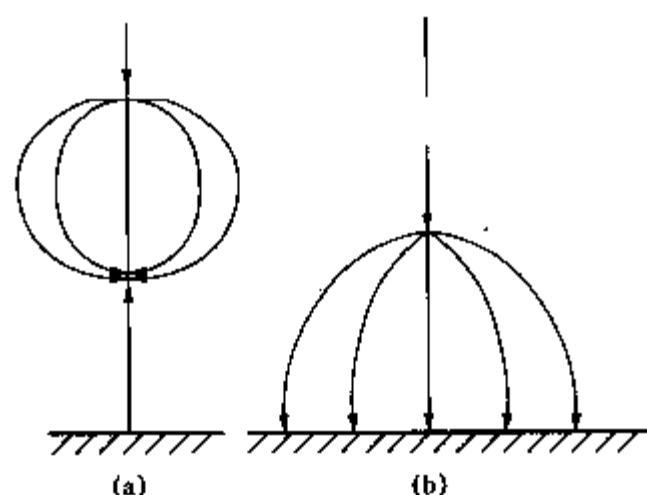


图 1-9 不均匀电场的几种典型的形式  
(a) 棒—棒间隙; (b) 棒—板间隙

的经验表达式为

$$E_c = 30m_1m_2\delta\left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}}\right) \quad (1-7)$$

式中  $r$ ——起晕导线的半径, cm;

$\delta$ ——空气的相对密度, 换算公式见式 (1-15);

$m_1$ ——导线表面粗糙系数, 根据不同情况, 约在 0.8~1.0 之间, 光滑导线取 1;

$m_2$ ——气象系数, 根据不同气象情况, 约在 0.8~1.0 之间, 好天气时取 1。

算得  $E_c$  后就不难根据电极布置求得电晕起始电压  $U_c$ 。例如, 对于离地高度为  $h$  的单相导线可写出

$$U_c = E_c r \ln \frac{2h}{r} \quad (1-8)$$

对于距离为  $D$  的两根平行导线 ( $D$  远大于  $r$ ), 则可写出

$$U_c = E_c r \ln \frac{D}{r} \quad (1-9)$$

对于三相输电导线, 上式中的  $U_c$  代表相电压,  $D$  为导线的几何均距,  $D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$ 。

### 3. 电晕放电的危害及限制措施

电晕放电会带来许多不利的影响。首先, 电晕放电时产生的光、声、热效应以及化学反应等都会引起能量损失; 其次, 电晕放电过程中的放电脉冲现象会产生高频电磁波, 对周围无线电通信、广播信号和电气测量造成干扰; 另外, 电晕放电还会使空气发生化学反应, 形成臭氧及氧化氮等产物, 对金属及有机绝缘物会产生氧化和腐蚀作用。此外, 在某些环境要求较高的场合, 电晕所发出的噪声也有可能超过环保标准。

因此, 研究电晕放电、如何限制电晕放电, 是高电压技术中的一项重要任务。例如, 建设超高压输电线路时, 由导线电晕造成的能量损耗及电磁波干扰就是必须考虑的问题。限制电晕放电最有效的措施就是增大电极的曲率半径, 改进电极形状, 例如超(特)高压线路采用分裂导线; 有些高压电器采用空心薄壳的、扩大尺寸的球面或旋转椭圆面等形式的电极; 变电站里采用管型空心硬母线等。

电晕的某些效应也有可以利用的一面。例如, 线路上发生电晕后可削弱线路上雷电或操作冲击波的幅值和陡度; 可利用电晕原理来净化工业废气, 制造净化水和空气用的臭氧发生器, 发展静电喷涂技术和电除尘(如图 1-10 所示)等; 在特殊情况下还可利用电晕来改善电场分布, 从而提高间隙的绝缘强度。

### 二、极不均匀电场中气隙的击穿过程

极不均匀电场中的气体放电过程有着与均匀电场(或稍不均匀电场)中气体放电不同的特征, 主要表现在: 极不均匀电场的气体放电过程中有持续的电晕放电; 存在极性效应; 长间隙与短间隙的放电又有所不同。

下面以常用的棒—板电极作为典型的极不均匀电场来讨论放电过程。这种间隙击穿以前, 棒电极附近的场强已很大, 足以引起强烈的游离, 从而在空间积聚起大量电荷使电场畸

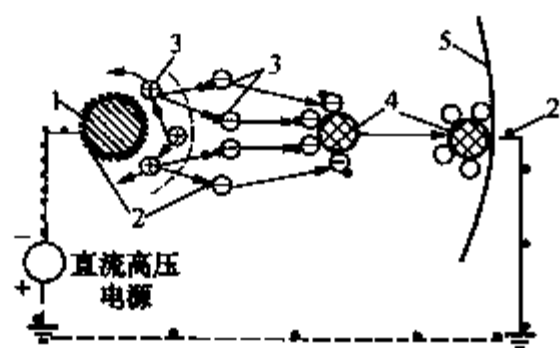


图 1-10 电集尘工作原理示意图

1—电晕线; 2—电子; 3—正负离子;  
4—粉尘颗粒; 5—阳极板

变,棒电极的极性不同,空间电荷对放电过程发展的影响也不同,所造成的气隙击穿电压和电晕起始电压也不同,即存在极性效应。

### (一) 短间隙的击穿

#### 1. 电子崩阶段 (非自持放电阶段)

(1) 正棒—负板。电晕起始前,由于棒附近场强很大,足以发展起相当强烈的电子崩过程,并进入强场区,如图 1-11 (a)

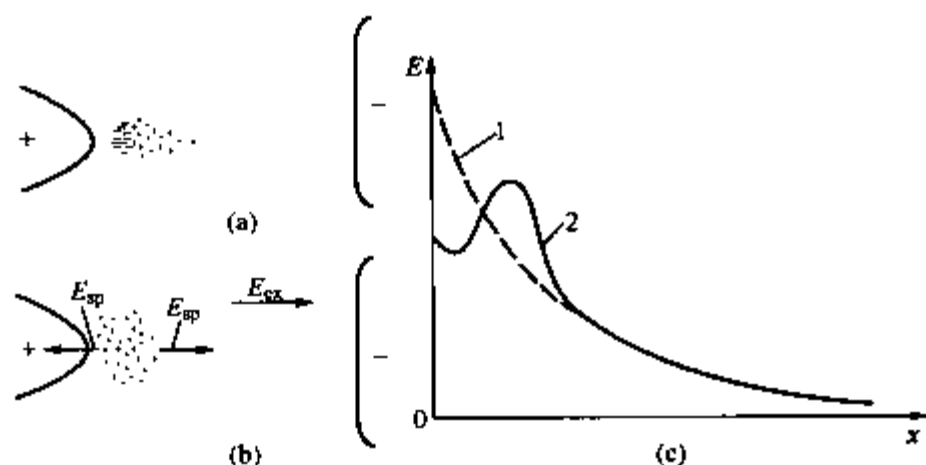


图 1-11 正棒—负板间隙中非自持放电阶段  
空间电荷对外电场的畸变作用  
 $E_{ex}$ —外电场;  $E_{sp}$ —空间电荷的电场

所示。崩头朝向正棒,崩中电子很快与正棒电极中和,而正离子相对来说缓慢地向板极移动,于是在正棒附近积聚起正空间电荷 [如图 1-11 (b) 所示],从而削弱了棒极附近的电场与游离过程,而略为加强外空间的电场 [如图 1-11 (c) 中曲线 2 所示,曲线 1 为外电场分布]。电子崩难以形成流注,这使得自持放电也即电晕放电难以形成,故电晕起始电压较高。

(2) 负棒—正板。负棒电极表面

强场区产生电子崩,如图 1-12 (a) 所示。崩头朝向正板,电子迅速离开强场区后以越来越慢的速度进入弱场区,不再能引起游离,一部分消失于板极,其余的形成非常分散的负离子空间,如图 1-12 (b) 所示。正离子逐渐向负棒运动而消失于棒极,但由于其运动速度较慢,所以负棒附近总是滞留部分正离子而形成比较集中的正空间电荷,使负棒附近电场加强 [如图 1-12 (c) 所示]。因而自持放电条件易于得到满足,电子崩容易形成流注而产生电晕放电,故电晕起始电压较低。

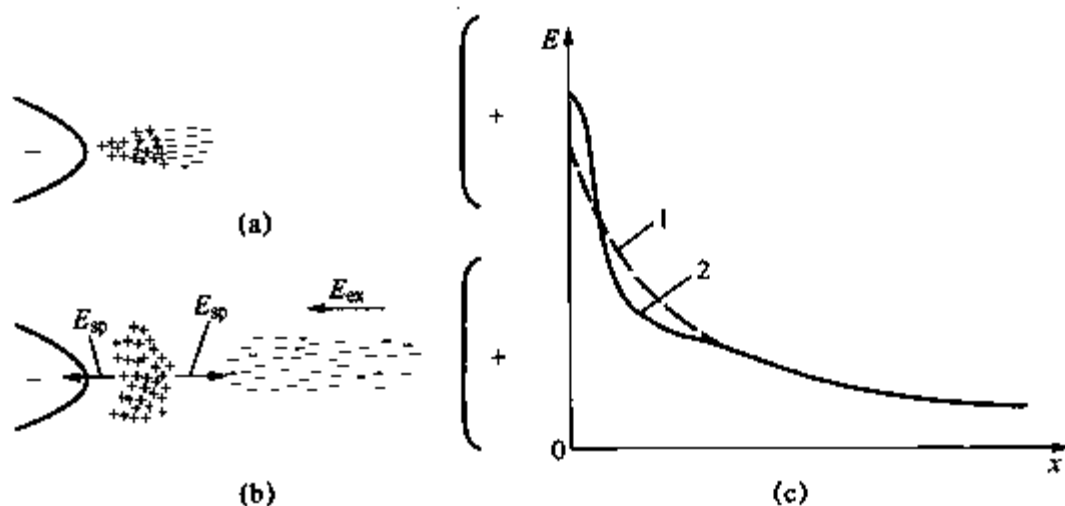


图 1-12 负棒—正板间隙中非自持放电阶段  
空间电荷对外电场的畸变作用  
 $E_{ex}$ —外电场;  $E_{sp}$ —空间电荷的电场

#### 2. 流注的形成与发展阶段 (自持放电阶段)

随着外加电压的升高,紧贴棒极附近电场增强形成流注,爆发电晕。以后,不同空间电荷对间隙放电的进一步发展所起的影响就和上述不同了。

(1) 正棒—负板。若电压足够高,正棒附近形成流注,由于外电场的特点,流注头部具有正电荷,如图 1-13 (a)、(b) 所示。头部的正电荷减少了等离子体中的电场,而加强了其头部电场,如图 1-13 (d) 中曲线 2 所示。流注头部前方电场得到加强,使前方电场易于产生新的电子崩,其电子造成发展正流注的有利条件。流注头部被加强的电场处产生新的电子崩 (二次电子崩),如图 1-13 (b) 所示。二次崩与初崩汇合形成流注,而流注及其头部 (二次崩尾

部)的正空间电荷加强了流注前方的电场,使流注进一步延长并向板极发展,如图 1-13 (c) 所示。这样,流注及其头部的正电荷使强场区更向前推移,如图 1-13 (d) 中曲线 3 所示。由于流注所产生的空间电荷总是加强前方的电场,所以它的发展是连续的,速度很快,与负棒相比,击穿同一间隙所需的电压要小得多。

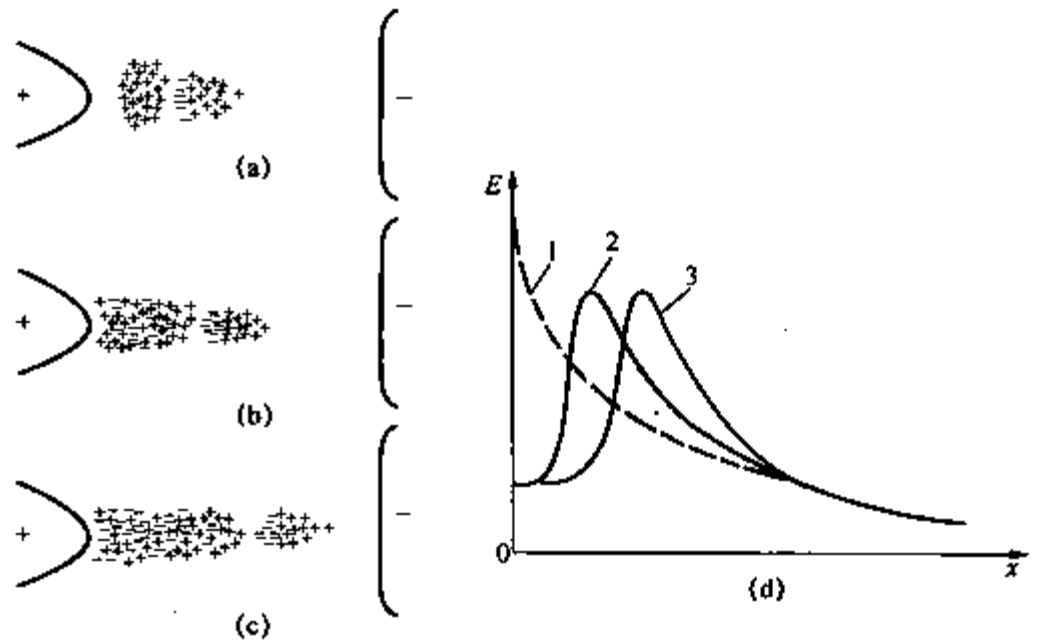


图 1-13 正棒—负板间隙中正流注的形成和发展

(2) 负棒—正板。负棒附近集中的正空间电荷虽然增强了负棒附近的电场,使流注容易形成,产生电晕,但后来的路程中场强愈来愈弱,流注的向前发展却比较困难。初崩留下的正空间电荷 [如图 1-14 (a) 所示] 削弱了前沿电场 (负空间电荷非常分散,对外电场影响不大),如图 1-14 (d) 中曲线 2 所示,使流注的向前发展受到抑制。

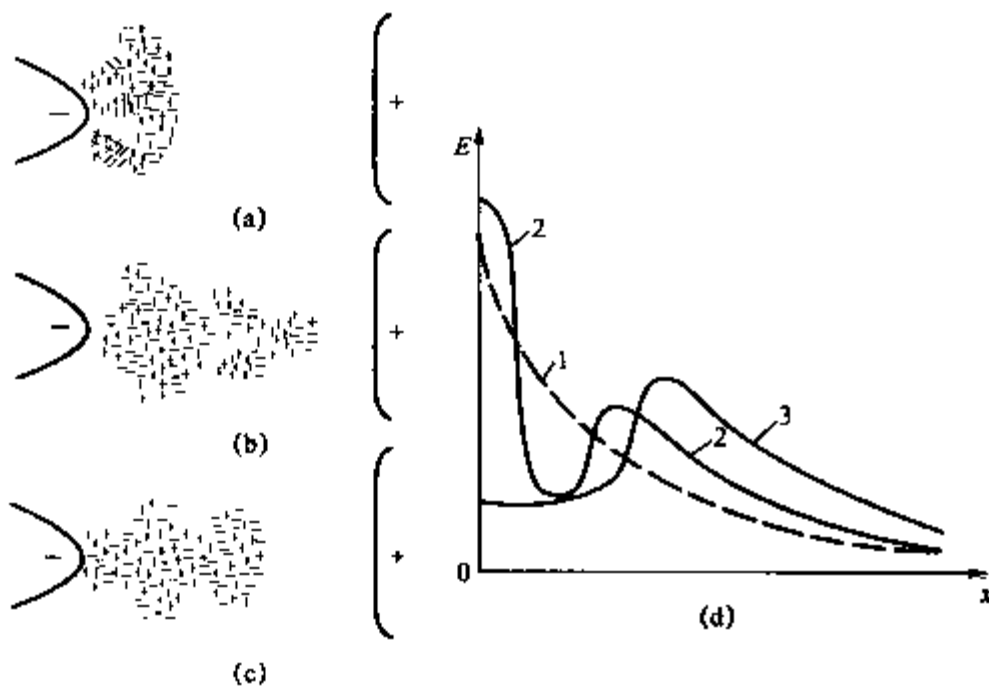


图 1-14 负棒—正板间隙中负流注的形成和发展

只有再升高电压,待初崩中向负棒方向 (向后) 发展的流注 [如图 1-14 (b) 所示] 完成 (较为容易),使前方电场加强以后, [如图 1-14 (d) 中曲线 3 所示],才可能在前方空间产生新的电子崩,如图 1-14 (c) 所示。新电子崩的发展过程与初崩相同。这样,就形成了自负棒向正板发展的负流注。由此可见,负流注的发展是阶段式的,平均速度比正流注小得多,故与正棒相比,击穿同一间隙所需的电压要大得多。

综上所述,所谓的极性效应就是在相同极间距下,负棒—正板的起始电晕电压较正棒—负板下为低,但由于其流注通道向板极的发展比较困难,所以其击穿电压反而比正棒—负板时的高。

当间隙距离较短时,电压进一步升高,个别流注 (不论是正流注还是负流注) 发展到对面电极时,整个间隙就被充满正负电荷的具有较大导电性的流注通道贯通。在电源电压作用下,流注中的带电质点继续从电源电场获得加速,得到能量,发展更强烈的游离,使流注中带电质点浓度急剧增长,通道温度和电导进一步急剧升高和变大,最后完全失去绝缘性能,气隙的击穿就完成了。

## (二) 长间隙的击穿

进一步的研究发现, 在间隙距离较长时, 除了与短间隙类似的上述过程外, 还存在新的、不同性质的放电过程。下面给予简要介绍。

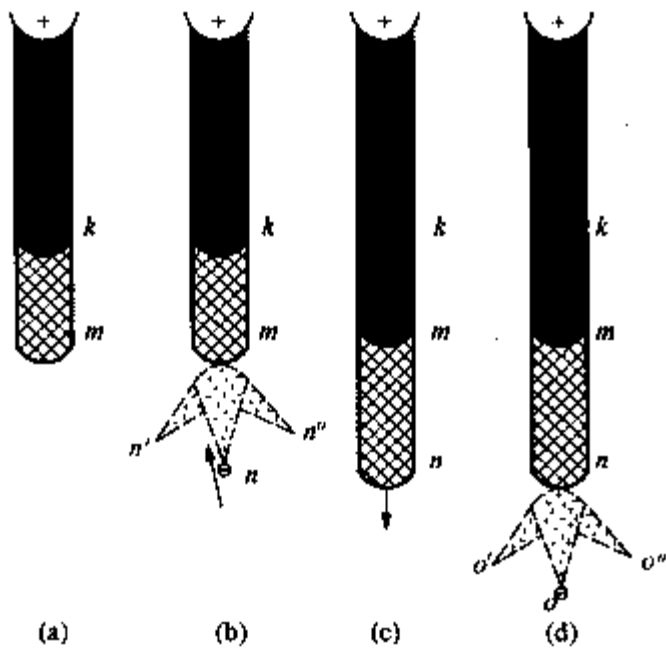


图 1-15 正棒-负板间隙中先导通道的发展

### 1. 先导放电阶段

如图 1-15 所示, 当间隙距离较长 (如棒-板间隙距离大于 1m) 时, 间隙内弱电场区增大, 流注还不足以贯通整个间隙, 此时从棒极开始的流注通道发展到足够的长度后, 将有较多的电子循通道流向电极, 通过通道根部的电子最多, 于是流注从根部开始发热 (温度可达数千度或更高, 足以使气体出现热游离), 出现一个茎状发亮的热游离通道, 这个具有热游离过程的通道称为先导通道。由于先导中出现了新的更为强烈的游离过程, 故先导通道中带电质点的浓度远大于流注通道, 因而电导更大, 压降更小。由于流注通道中的一部分转变为先导, 使得流注头部的电场加强,

从而为流注继续伸长到对面电极并迅速转变为先导创造了条件。这个过程称为先导放电。

### 2. 主放电阶段

当先导通道发展到接近对面电极时, 在余下的小间隙中场强达到极大的数值, 从而引起强烈的游离, 这一间隙中出现了离子浓度远大于先导的等离子体, 这一强游离区又以极高的速度向相反方向传播, 同时中和先导通道中多余的空间电荷, 这个过程称为主放电。主放电过程使贯穿两极间的通道最终形成成为温度很高、电导很大、轴向场强很小的等离子体火花通道, 这时的间隙接近于短路状态, 使气隙完全失去了绝缘性能, 至此即完成了长间隙的击穿。自然界中的雷电放电就是属于典型的超长间隙放电。

长间隙的放电大致可分为先导放电和主放电两个阶段, 在先导放电阶段中包括电子崩和流注的形成与发展过程。不太长间隙的放电没有先导放电阶段, 只分为电子崩、流注和主放电阶段。

由于间隙越长, 先导过程与主放电过程就发展得越充分, 所以长间隙的平均击穿场强比短间隙的平均击穿场强低。

## 第四节 不同电压形式下空气间隙的击穿特性

从前述气体的击穿过程可以看出, 气隙的击穿电压与电场均匀程度、电极形状、极间距 (本章前面三节已介绍)、气体的状态以及气体种类 (将分别在本章第五节和第八节里介绍) 有关。除此以外, 气隙的击穿电压还与外加的电压形式 (这里指直流电压、交流电压、雷电冲击电压、操作冲击电压等) 有非常大的关系。本节主要介绍不同电压形式下空气间隙的击穿特性。

按作用时间的长短, 外加电压形式可分为两类: 一类称为持续作用电压 (这类电压持续时间较长, 变化速度较小, 如直流电压和工频电压); 另一类称为冲击电压 (这类电压持续时间极短, 以  $\mu s$  计, 变化速度很快, 如雷电冲击电压和操作冲击电压)。在持续作用电压

下, 间隙放电发展所需的时间可以忽略不计, 此时仅需考虑其电压大小即可 (注: 前面三节对气体放电过程的研究就是基于此前提的)。但是在冲击电压下, 电压作用时间短到可以与放电需要的时间相比拟, 这时放电发展所需的时间就不能忽略不计了。鉴于此, 本节首先介绍冲击电压作用下气隙出现的一些新特性, 同时引入一些新概念, 然后分别介绍不同电压形式下气隙的击穿电压。

### 一、冲击电压作用下气隙的击穿特性及相关概念

#### 1. 放电时间

每个间隙都有它的最低静态击穿电压, 即长时间作用在间隙上能使间隙击穿的最低电压值, 通常用  $U_0$  表示。所以, 欲使间隙击穿, 外加电压必须不小于  $U_0$ 。但这仅仅是必要条件, 而不是充分条件。如图 1-16 所示, 当对静态击穿电压为  $U_0$  的间隙施以冲击电压时, 经  $t_0$  时间后, 电压上升到  $U_0$ , 但间隙并不立刻击穿, 而需经过  $t_{lag}$  时间后才能击穿, 也就是说间隙的击穿, 不仅需要足够的电压, 还需要足够的时间。这是因为放电发展总需要一定的时间。

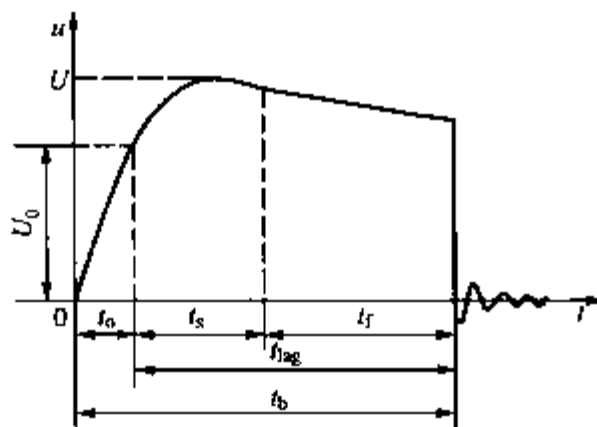


图 1-16 冲击电压下气隙的击穿

全部放电时间为

$$t_b = t_0 + t_s + t_f = t_0 + t_{lag}$$

式中  $t_b$ ——放电时间;

$t_0$ ——升压时间, 电压从零升高到  $U_0$  所需的时间;

$t_s$ ——统计时延, 从电压升到  $U_0$  的时刻起到气隙中形成第一个有效电子的时间;

$t_f$ ——放电形成时延, 从形成第一个有效电子的时刻起到气隙完全被击穿的时间;

$t_{lag}$ ——放电时延,  $t_{lag} = t_s + t_f$ 。

放电时延  $t_{lag}$  与电场均匀程度关系密切。电场比较均匀时, 由于平均场强很高, 放电发展速度很快, 所以放电形成时延较短, 放电时延实际上就约等于统计时延。在极不均匀电场中, 由于局部场强很高, 但平均场强较低, 所以间隙上出现有效电子的概率增加, 统计时延较短, 放电形成时延较长, 放电时延主要决定于放电形成时延。

放电时延还与外加电压大小、外界照射等因素有关。随着间隙上外施电压的增加  $t_s$  将减小, 因为此时间隙中出现的自由电子转变为有效电子的概率增加。若用紫外线等高能射线照射间隙, 使阴极释放出更多的电子, 就能减少  $t_s$ 。这一措施对避雷器火花间隙在冲击电压作用下缩短放电时延十分有效, 利用球隙测量冲击电压时, 有时也需要采用该措施。增加间隙上的电压, 电子的运动速度及游离能力也会增大, 从而使  $t_f$  也减小。

#### 2. 冲击电压的标准波形

冲击电压分为雷电冲击电压与操作冲击电压两种类型。

雷电冲击电压是由于电力系统遭受雷击而引起的一种过电压。为了检验绝缘耐受雷电冲击电压的能力, 在实验室中可以利用冲击电压发生器产生冲击高压, 以模拟雷电放电引起的过电压。大自然中雷电冲击电压的波形各异, 为了统一实验结果, 并对实验作出统一的评价, IEC 规定了标准的雷电冲击电压全波波形。

由于实验室中一般用示波器摄取的冲击电压波形图在 origin 附近往往模糊不清, 波峰附近

波形较平, 不易确定原点及峰值的位置, 因此通常把经过  $0.3U_m$  和  $0.9U_m$  两点构成的直线作为视在波前时间  $T_1$ ; 从视在原点  $0'$  起, 出现雷电冲击峰值, 再到电压衰减为峰值的一半这段时间, 称为视在半峰值时间  $T_2$ , 如图 1-17 所示。

IEC 规定标准雷电冲击电压全波波形参数为:  $T_1 = 1.2\mu s$ , 容许偏差  $\pm 30\%$ ;  $T_2 = 50\mu s$ , 容许偏差  $\pm 20\%$ , 一般简写成  $T_1/T_2 = 1.2/50\mu s$ , 并标明极性。当电力系统绝缘遭受雷击而突然发生放电, 波形即被截断, 被截断的雷电冲击电压波称为雷电冲击电压截波 (主要考验设备的纵绝缘), 如图 1-18 所示。IEC 规定标准雷电冲击电压截波参数为:  $T_1 = 1.2\mu s$ , 容许偏差  $\pm 30\%$ ;  $T_2 = 2 \sim 5\mu s$ , 称为截断时间, 可简写成  $T_1/T_2 = 1.2/2 \sim 5\mu s$ 。

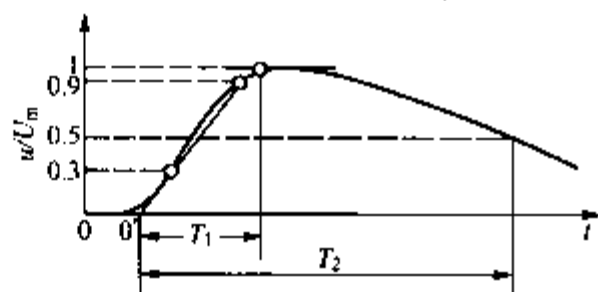


图 1-17 标准雷电冲击电压波形

$T_1$ —视在波前时间;  $T_2$ —视在半峰值时间;  
 $U_m$ —雷电冲击电压峰值;  $0'$  视在原点

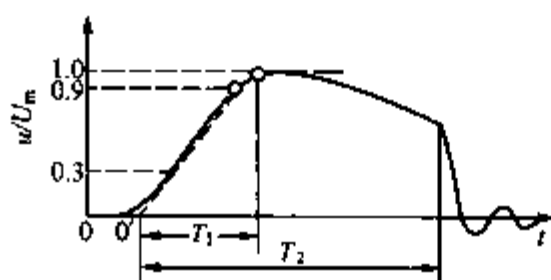


图 1-18 雷电冲击电压截波

$T_1$ —波前时间;  $T_2$ —截断时间;  
 $U_m$ —雷电冲击电压截波峰值

操作冲击电压是由于电力系统操作或发生事故时, 因状态发生突然变化引起电感和电容

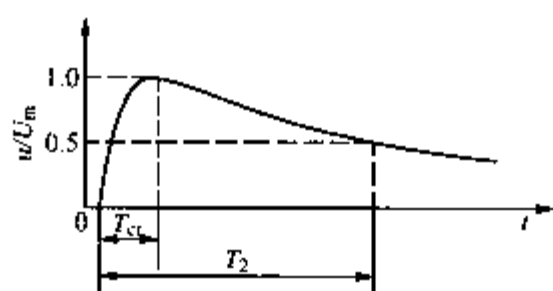


图 1-19 操作冲击电压标准波形

回路的振荡而产生的过电压。随着电力系统工作电压的不断提高, 操作过电压下的绝缘问题越来越突出。目前 IEC 标准规定, 额定电压在 330kV 及以上的高压电气设备都要进行操作冲击电压试验。为了模拟操作过电压, 也需要规定一定的标准波形, 如图 1-19 所示。IEC 标准规定, 波前时间  $T_1 = 250\mu s \pm 20\%$ , 半峰值时间  $T_2 = 2500\mu s \pm 60\%$ , 可简写成  $T_1/T_2 = 250/2500\mu s$ , 并标明其极性。当在试验

中上述标准波形不能满足要求时, 推荐采用  $100/2500\mu s$  或  $500/2500\mu s$  的波形。

### 3. $U_{50\%}$ 及冲击系数 $\beta$

在持续电压作用下, 当气体状态不变时, 一定距离的间隙, 其击穿电压具有确定的数值。但是在冲击电压作用下, 情况就不同了。为了求得在冲击电压作用下空气间隙的击穿电压, 保持冲击电压的波形不变, 逐渐升高冲击电压的幅值。在此过程中发现, 当冲击电压的幅值很低时, 每次施加电压间隙都不击穿; 随着外施电压的升高, 放电时延缩短, 因此, 当电压幅值增加到某一定值时, 由于放电时延有分散性, 对于较短的放电时延, 击穿有可能发生。即在多次施加此电压时, 击穿有时发生, 有时不发生。随着电压幅值的继续升高, 多次施加电压时间间隙击穿的百分比越来越高; 最后当冲击电压的幅值超过某一值后, 间隙在每次施加电压时都将发生击穿。从说明间隙耐受冲击电压的能力看, 当然希望求得刚好发生击穿时的电压, 但这个电压值在实验中很难准确求得, 所以工程上采用了 50% 冲击放电电压, 用  $U_{50\%}$  表示。 $U_{50\%}$  就是指在该冲击电压作用下, 放电的概率为 50%。显然, 确定  $U_{50\%}$  时施加电压的次数  $N$  愈多, 得到的  $U_{50\%}$  愈准确, 但工作量也愈大。所以在工程实际中, 通常以施加 10 次电压中有 4~6 次击穿, 即可认为这一电压就是气隙的 50% 冲击击穿电压。

工程上, 如果采用  $U_{50\%}$  来决定所用气隙距离时, 要注意根据分散性的大小, 留出足够

的裕度。冲击击穿电压的放电概率一般认为服从高斯分布，一般取相对标准偏差 $\sigma$ 为3%。

50%冲击击穿电压与静态击穿电压 $U_0$ 的比值称为绝缘的冲击系数，用 $\beta$ 表示：

$$\beta = \frac{U_{50\%}}{U_0} \quad (1-10)$$

在均匀电场和稍不均匀电场中，由于放电时延较短，击穿电压分散性很小， $\beta \approx 1$ ，且在 $U_{50\%}$ 作用下，击穿通常发生在波前峰值附近；在极不均匀电场中，由于放电时延较长，击穿电压分散性较大， $\beta > 1$ ，且在 $U_{50\%}$ 作用下，击穿通常发生在波尾部分。

#### 4. 伏秒特性

前已述及，气隙的击穿需要一定的时间才能完成，对于冲击电压，气隙的击穿与该电压作用时间有很大关系，一个气隙的耐电性能就不能单一地用“击穿电压”值来表达了，而是对于某一定的电压波形，必须用电压峰值和击穿时间这两者共同来表达，这就是气隙在该电压波形下的伏秒特性。

工程上用气隙出现的电压最大值和放电时间的关系来表示气隙在冲击电压下的击穿特性，称为气隙的伏秒特性。把这种表示击穿电压和放电时间关系的“电压—时间”曲线称为伏秒特性曲线。

伏秒特性通常用实验方法求取，如图1-20所示。对某一间隙施加冲击电压，保持其波形不变，逐渐升高冲击电压的峰值，得到该间隙的放电电压 $u$ 与放电时间 $t$ 的关系，则可绘出伏秒特性。作图时要注意，当击穿发生在波尾时，伏秒特性上该点的电压值应取冲击电压的峰值，因为在击穿过程中起作用的应是曾经作用过的冲击电压峰值而不是击穿时的电压值。

实际上，由于放电时间具有分散性，同一个间隙在同一幅值的标准冲击电压波的多次作用下，每次击穿所需的时间不同，在每一电压下可得到一系列的放电时间。所以伏秒特性曲线是以上、下包络线为界的一个带状区域。

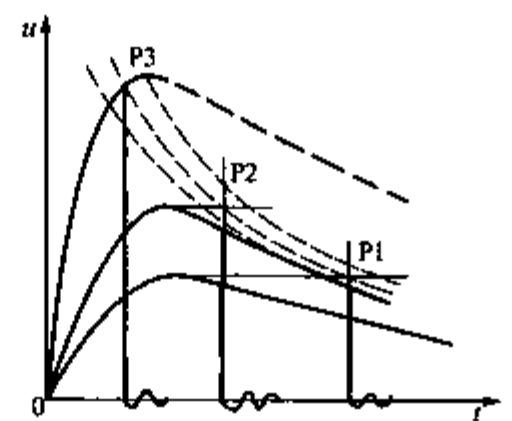


图 1-20 伏秒特性绘制方法

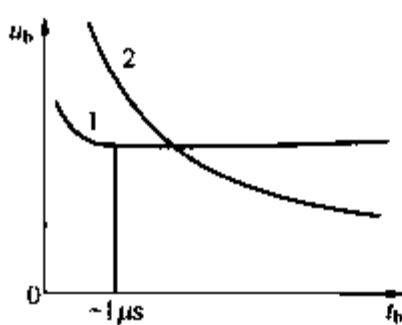


图 1-21 均匀电场和不均匀电场气隙的伏秒特性示意图

1—稍不均匀电场；  
2—极不均匀电场

气隙的伏秒特性形状与极间电场的分布情况有关，如图1-21所示。对于均匀或稍不均匀电场，间隙的伏秒特性曲线比较平坦，而且分散性也较小，只在放电时间小于 $1\mu\text{s}$ 左右时略向上翘。对于极不均匀电场，其间隙的伏秒特性曲线比较陡峭，而且分散性也较大，在放电时间还相当大时，便随时间 $t$ 的减少而明显地上翘。

伏秒特性是防雷设计中实现保护设备和被保护设备间绝缘配合的依据。如图1-22和图1-23所示， $S_1$ 表示被保护设备绝缘的伏秒特性曲线， $S_2$ 表示与其并联的保护设备绝缘的伏秒特性曲线。在图1-22中， $S_2$ 总是低于 $S_1$ ，显然在同一冲击电压作用下，保护设备总是先动作（ $S_2$ 间隙先击穿），从而限制了过电压的幅值而起到保护作用。在图1-23中， $S_2$ 与 $S_1$ 相交，当冲击电压峰值较低时， $S_2$ 先击穿， $S_1$ 得到保护不被击穿，但当冲击电压峰值较高时，反而是 $S_1$ 先击穿而得不到 $S_2$ 的保护。

通过图1-22和图1-23的比较不难看出，为了使被保护设备能得到可靠的保护，保护

设备绝缘的伏秒特性曲线的上包线必须始终低于被保护设备的伏秒特性曲线的下包线。同时,为了能得到较理想的绝缘配合,保护设备绝缘的伏秒特性曲线总希望平坦一些,分散性小一些,即保护设备应采用电场比较均匀的绝缘结构。

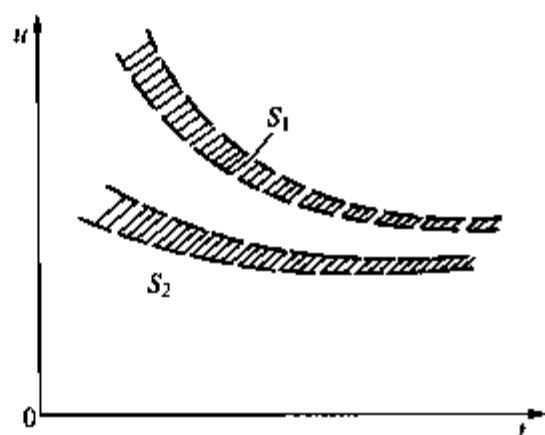


图 1-22 两个间隙伏秒特性  
 $S_2$  低于  $S_1$  时

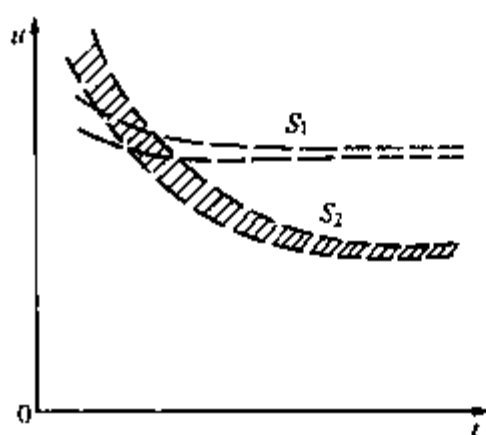


图 1-23 两个间隙伏秒特性  
 $S_2$  与  $S_1$  相交叉时

## 二、不同电压形式下气隙的击穿电压

### 1. 均匀电场气隙的击穿电压

在均匀电场中,间隙距离不可能很大,各处场强又大致相等,而且电场是对称的,所以击穿前无电晕,无极性效应,放电所需的时间很短。因此,在不同形式电压(指直流、工频、雷电冲击、操作冲击,下同)作用下,其击穿电压(注意这里的直流电压指的是平均值,工频电压指的是峰值、冲击电压指的是  $U_{50\%}$ )都相同,击穿电压的分散性也很小。对于空气,均匀电场的击穿电压  $U_b$ (峰值)可用以下经验公式计算,

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08 \sqrt{\delta d} \quad (1-11)$$

式中  $U_b$ ——空气间隙的击穿电压(峰值), kV;

$d$ ——间隙距离, cm;

$\delta$ ——空气相对密度。

在标准大气条件下,均匀电场中空气的电气强度(峰值)大致等于 30kV/cm。

### 2. 稍不均匀电场气隙的击穿电压

与均匀电场相似,稍不均匀电场中的气隙击穿以前不会形成稳定的电晕,换句话说,一旦局部区域出现电晕,将立即导致整个间隙击穿。在设计 SF<sub>6</sub> 绝缘结构时要特别注意这一点。稍不均匀电场的间隙距离一般不很大,整个间隙的放电时延仍很短,因此在各种不同形式电压作用下,其击穿电压实际上也都相同,且其分散性也不大。

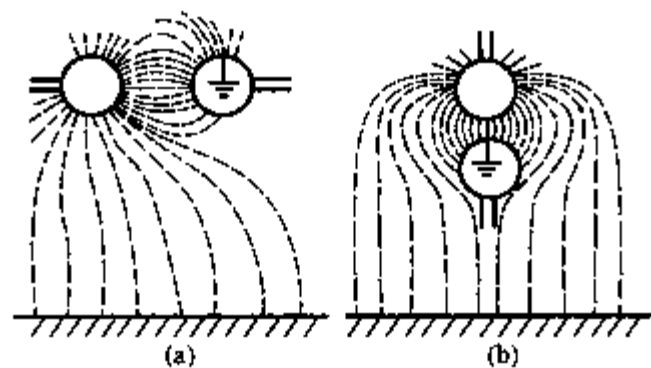


图 1-24 一球接地时的电场分布  
(a) 水平放置; (b) 垂直放置

值得注意的是,在稍不均匀电场不对称时,极性效应有所反映,但不很明显。比如,球一球间隙中若一球接地,由于大地对电场的畸变作用使得不接地球处电场增强,间隙中电场分布就变得不对称了,如图 1-24 所示。结果不论是直流电压还是冲击电压,不接地球为正极性时的击穿电压开始变得大于负极性下的数值。工频电压下由于击穿总是发生在容易击穿的半周,所以其击穿电压和负极性下的相同。这与极不均匀电场中的极性效应是相反的,即电场最强的电极为

负极性时的击穿电压反而略低于正极性时的数值。

### 3. 极不均匀电场气隙的击穿电压

在极不均匀电场的气隙中,棒—板间隙(不对称电场)和棒—棒间隙(对称电场)具有典型意义,比如输电线路的导线与大地之间就可视为“棒—板”间隙,导线与导线之间则视为“棒—棒”间隙。其他类型的极不均匀电场气隙的击穿特性均介于这两者之间。

和均匀及稍不均匀电场中不同,极不均匀电场中直流、工频及冲击击穿电压间的差别比较明显,分散性也较大,且极性效应显著。下面就不同形式的电压分别予以讨论。

#### (1) 直流电压下的击穿电压。

由实验获得棒—板与棒—棒空气间隙的直流击穿电压  $U_b$  与间隙距离  $d$  的关系如图 1-25 (a) 所示。由图可见,对棒—板间隙,其击穿电压正如前述的具有明显的极性效应。在所测的极间距离范围内 ( $d=10\text{cm}$ ),负极性击穿场强约为  $20\text{kV/cm}$ ;而正极性击穿场强只有  $7.5\text{kV/cm}$ ,相差较大。棒—棒间隙由于是对称电场,故无明显极性效应,其击穿电压介于棒—板间隙在两种极性下的击穿电压之间。这不难理解:因为棒—棒间隙中存在正极性尖端,容易由此发展放电,

所以其击穿电压比同样间隙距离的负棒—正板的低;但棒—棒间隙是对称电场,在同样间隙距离下,其电场相对于棒—板间隙来说较为均匀些,故其击穿电压又比正棒—负板间隙的高。

为了进行超高压直流输电线路的绝缘设计,需要研究长间隙棒—板气隙的直流击穿特性。300cm 以内的棒—板间隙的实验结果如图 1-25 (b) 所示。由图可见,此时负极性的平均击穿场强降至  $10\text{kV/cm}$  左右,正极性的平均击穿场强降至  $4.5\text{kV/cm}$  左右。对较大间隙的 ( $50\sim 300\text{cm}$ ) 的棒—棒间隙,其直流电压下的平均击穿场强约在  $4.8\text{kV/cm}\sim 5.0\text{kV/cm}$  左右。

(2) 工频电压下的击穿电压。在工频电压作用下,不同间隙的击穿电压  $U_b$  和间隙距离  $d$  的关系如图 1-26 所示。由于极性效应,棒—板间隙在工频电压作用下的击穿总是在棒的极性为正、电压达峰值时发生,但其击穿电压的峰值稍低于其直流击穿电压,这是由于前半周期留下的空间电荷对棒极前方的电场有所加强之故。

当间隙距离不太大时,击穿电压基本上与间隙距离呈线性上升的关系。例如,在间隙距离为  $1\text{m}$  左右时,棒—棒平均击穿场强约为  $4.0\text{kV/cm}$  (有效值) 或  $5.66\text{kV/cm}$  (峰值);棒—板平均击穿场强约为  $3.7\text{kV/cm}$  (有效值) 或  $5.23\text{kV/cm}$  (峰值)。

但是当间隙距离很大时,击穿电压与间隙距离的关系出现明显的饱和现象,特别是棒—板间隙,其饱和趋向尤甚,如图 1-27 所示。例如,在间隙距离为  $10\text{m}$  左右时,棒—板的平均击穿场强仅为  $1.5\text{kV/cm}$  (有效值) 或  $2.1\text{kV/cm}$  (峰值)。因此在设计高压装置时,应尽

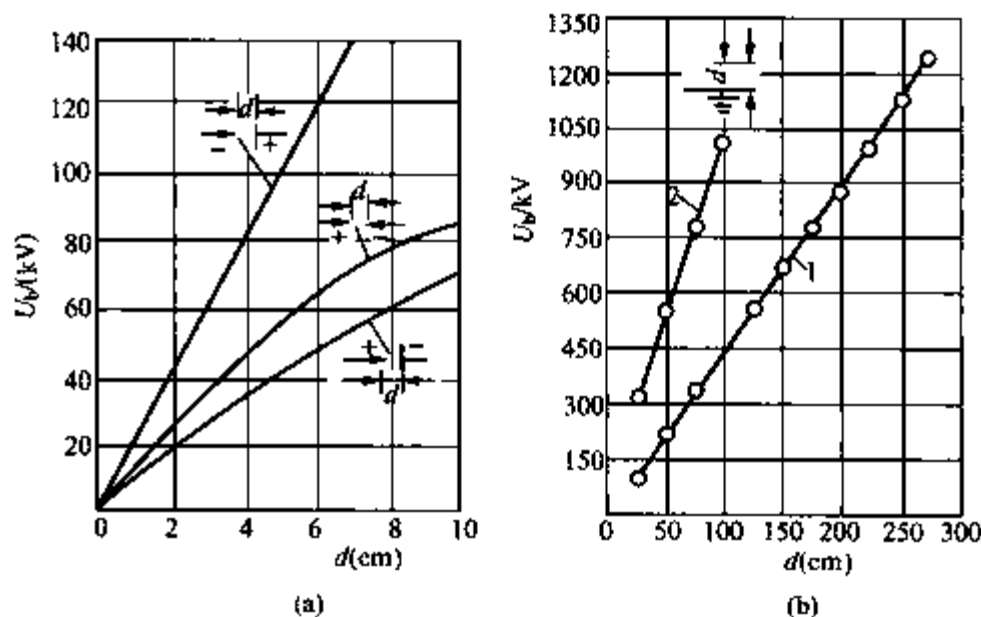


图 1-25 棒—板、棒—棒间隙的直流击穿电压  $U_b$  与间隙距离  $d$  的关系

(a) 短间隙  $U_b$  与  $d$  间关系; (b) 长间隙  $U_b$  与  $d$  间关系  
1—正极性; 2—负极性

量采用棒—棒类对称型的电极结构, 而避免棒—板类不对称的电极结构。

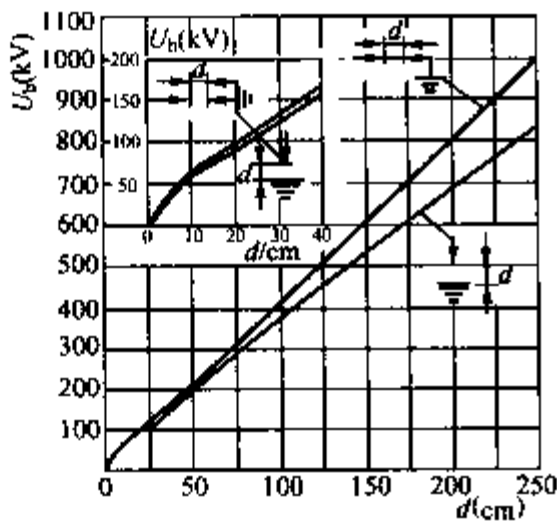


图 1-26 棒—棒和棒—板间隙的工频击穿电压与间隙距离的关系

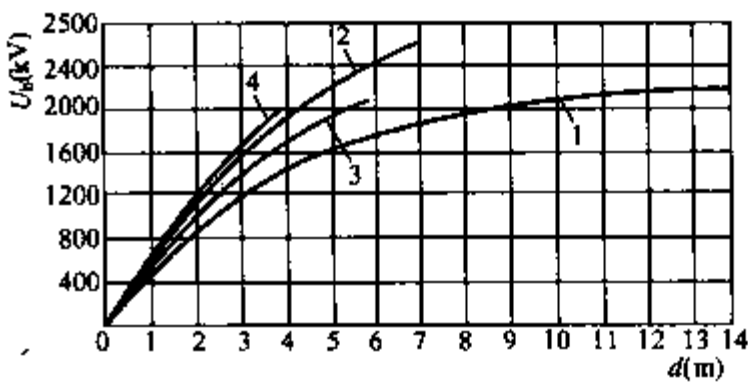


图 1-27 各种长空气间隙的工频击穿特性曲线  
1—棒—板间隙; 2—棒—棒间隙;  
3—导线对杆塔; 4—导线对导线

(3) 雷电冲击电压下的击穿电压。在标准雷电波形下, 当气隙距离  $d < 250\text{cm}$  时, 棒—棒及棒—板空气间隙的雷电冲击 50% 击穿电压和间隙距离的关系如图 1-28 所示。由图可知, 棒—板间隙具有明显的极性效应, 棒—棒间隙也有不大的极性效应。这是由于大地的影响, 使不接地的棒极附近电场增强的缘故。同时还可以看出, 棒—棒间隙的击穿电压介于棒—板间隙两种极性的击穿电压之间。

当气隙距离更大时, 其实验数据如图 1-29 所示。由图示可见, 击穿电压与气隙距离呈直线关系。

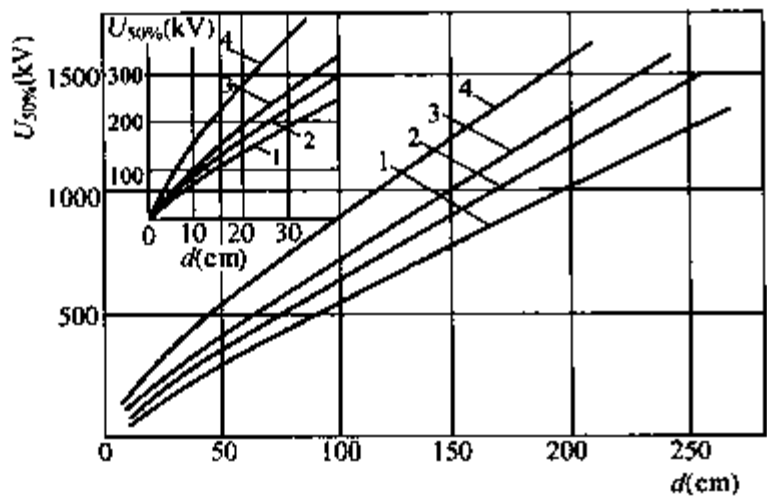


图 1-28  $d < 250\text{cm}$  的棒间隙雷电冲击 50% 击穿电压与极间距离的关系

1—棒—板, 正极性; 2—棒—棒, 正极性;  
3—棒—棒, 负极性; 4—棒—板, 负极性

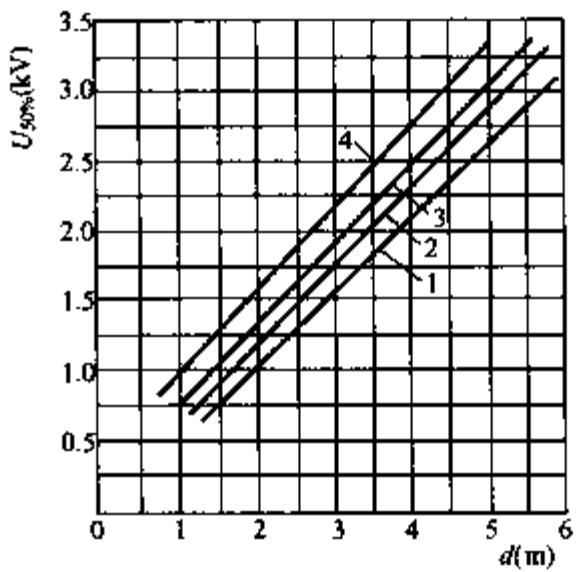


图 1-29 棒—板和棒—棒长间隙的雷电冲击击穿特性

1—棒—板, 正极性; 2—棒—棒, 正极性;  
3—棒—棒, 负极性; 4—棒—板, 负极性

(4) 操作冲击电压下的击穿电压。实验结果表明: 在极不均匀电场中, 正极性操作冲击 50% 击穿电压比负极性的要低。长空气间隙的操作冲击击穿通常发生在波前部分, 其击穿电压与波前时间  $T_{\alpha}$  有关而与波尾时间基本无关。图 1-30 是棒—板空气间隙的正极性操作冲击  $U_{50\%}$  和波前时间  $T_{\alpha}$  的关系。从图中可以看出, 曲线呈“U”形, 在某一波前时间  $T_c$  (称为临界波前时间) 下  $U_{50\%}$  有极小值。上述  $T_c$  的值随着气隙距离的增加而增大, 在工程实际

中所遇到的  $d$  值范围内, 该值大约在  $100 \sim 500 \mu\text{s}$ , 这正是把标准操作冲击电压波的波前时间  $T_c$  规定为  $250 \mu\text{s}$  的主要原因。

实验还表明, 在某些波前时间范围内, 气隙的操作冲击击穿电压甚至比工频击穿电压还低。因此, 在确定电气设备的空气间距时, 必须考虑这一重要情况。一般认为, 在  $330 \text{kV}$  及以上的超高压系统中, 应按操作过电压下的电气特性进行绝缘设计及其实验, 而不宜像一般高压电气设备那样采用工频电压作等效性实验。

如图 1-31 所示, 极不均匀电场长间隙的操作冲击击穿电压特性具有显著的“饱和”效应 (间隙长度超过  $5 \text{m}$  时)。当间隙距离达  $25 \text{m}$  时, 操作冲击下的最低击穿强度仅为  $1 \text{kV/cm}$ 。这对发展特高压输电技术是一个极为不利的制约因素。

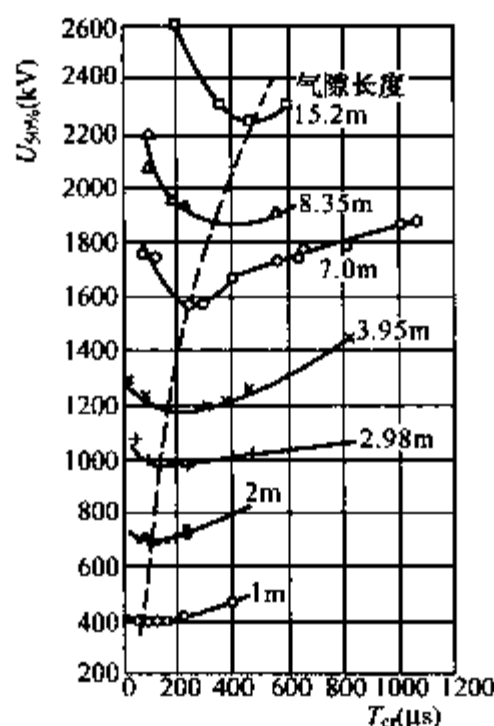


图 1-30 棒—板气隙正极性操作冲击  $U_{50\%}$  击穿电压与波前时间的关系

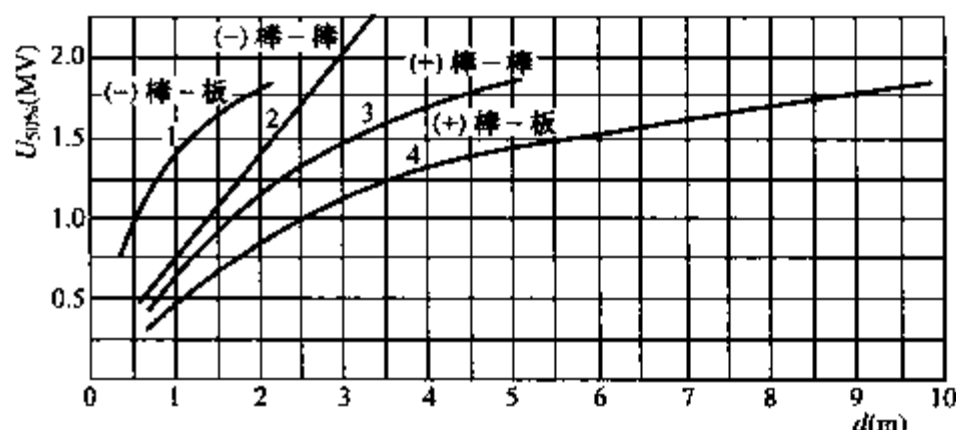


图 1-31 棒间隙在操作冲击电压 ( $500/5000 \mu\text{s}$ ) 下的击穿特性

当气隙距离  $d$  在  $2 \sim 15 \text{m}$  时, 棒—板间隙的  $50\%$  操作冲击击穿电压的最小值  $U_{50\%, \min}$  可用下面的经验公式估算

$$U_{50\%, \min} = \frac{3.4 \times 10^3}{1 + \frac{8}{d}} (\text{kV}) \quad (1-12)$$

当气隙距离  $d$  在  $15 \sim 27 \text{m}$  时, 棒—板间隙的  $50\%$  操作冲击击穿电压的最小值  $U_{50\%, \min}$  可用下式估算

$$U_{50\%, \min} = (1.4 + 0.055d) \times 10^3 (\text{kV}) \quad (1-13)$$

## 第五节 大气条件对空气间隙击穿电压的影响

实验表明, 同一气隙在不同的大气条件 (通常指的是大气压力、温度与湿度) 下的击穿电压亦不同。其实, 这也可从前述气体放电的基本理论加以解释, 因为气压、温度和湿度都会影响空气的密度、电子的自由行程、碰撞游离及吸附效应, 所以必然会影响气隙的击穿电压。

我们知道, 各地的气象条件是不同的, 即使同一地点, 也随昼夜、季节的变更而有所变

化。为了便于相互比较,首先要确定一个标准的大气条件。我国规定的标准大气条件为:气压  $p_0 = 101.33 \text{ kPa}$ ; 温度  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ; 绝对湿度  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ 。

在实际实验条件下空气间隙的击穿电压  $U$  与标准大气条件下的击穿电压  $U_0$  之间,可以通过相应的校正系数进行如下换算

$$U = \frac{K_d}{K_h} U_0 \quad (1-14)$$

式中  $K_d$ ——空气相对密度校正系数;

$K_h$ ——空气湿度校正系数。

### 一、气压、温度对击穿电压的影响

当气压或温度改变时,其结果都反映为空气相对密度  $\delta$  的变化。空气的相对密度  $\delta$  为试验条件下的密度与标准大气条件下的密度之比。空气的相对密度与大气压力成正比,与温度成反比,即

$$\delta = \frac{\delta_s}{\delta_0} = \frac{273 + t_0}{273 + t} \times \frac{p}{p_0} = 2.89 \times \frac{p}{273 + t} \quad (1-15)$$

式中  $\delta$ ——空气的相对密度;

$p$ ——实际大气条件下的气压,  $\text{kPa}$ ;

$t$ ——实际大气条件下温度,  $^\circ\text{C}$ 。

在大气条件下,气隙的击穿电压随  $\delta$  的增大而升高。实验证明,当  $\delta$  在  $0.95 \sim 1.05$  时,气隙的击穿电压几乎与  $\delta$  成正比,即此时的空气密度校正系数可取为  $K_d = \delta$ , 故

$$U = \delta U_0 \quad (1-16)$$

式 (1-16) 是对  $1 \text{ m}$  以下的间隙进行试验的基础上得到的,对于均匀电场、不均匀电场、直流电压、工频电压或冲击电压都适用。

近年来对长间隙击穿特性的研究表明,间隙击穿电压与大气条件变化的关系并不是一种简单的线性关系,而是随电极形状、电压种类和气隙距离而变化的复杂关系。具体校正方法读者可参阅有关国家标准的规定,这里不作介绍。

### 二、湿度对击穿电压的影响

湿度反映了空气中所含水蒸气的多少。单位体积的空气中所含水蒸气的质量,称为绝对湿度,即  $1 \text{ m}^3$  容积的空气中所含水蒸气多少克 ( $\text{g/m}^3$ )。由于吸附效应,大气中所含的水蒸气对气隙的放电过程起着一定的抑制作用,故大气的湿度增大,气隙的击穿电压也随之升高。不过,在均匀或稍不均匀电场中,湿度对击穿电压的影响可以忽略不计(略有增加,但程度甚微),这是因为均匀电场中平均场强较高,电子的运动速度较快,不易被水分子吸附而形成负离子。例如,用球隙测量电压时,只需根据空气相对密度校正其击穿电压,而不必考虑湿度的影响。而在极不均匀电场中,由于平均击穿场强较低,电子的运动速度较慢,水分子更容易吸附电子而形成负离子,故湿度增大后,空气的击穿电压将有明显的提高。这时湿度校正系数可用下式表示

$$K_h = k^\omega \quad (1-17)$$

式中的  $k$  与绝对湿度和电压类型有关;指数  $\omega$  的值与电极形状、气隙距离、电压类型及其极性有关,具体取值可参阅有关国家标准。

### 三、海拔高度对击穿电压的影响

随着海拔高度的增加,空气逐渐稀薄,气压与空气相对密度下降,因而空气的电气强度

也随之降低。

考虑到这一影响,我国国家标准规定:对于安装在海拔高度高于1 000m(但不超过4 000m)处的电力设施的外绝缘,其试验电压 $U$ 应按规定的标准大气条件下的试验电压乘以系数 $k_a$ 。 $k_a$ 按下式计算

$$k_a = \frac{1}{1.1 - \frac{H}{10\,000}} \quad (1-18)$$

式中  $H$ ——安装地点的海拔高度, m。

## 第六节 提高气隙击穿电压的措施

在高压电气设备中气体介质是经常遇到的,为了保证具有足够高的电气强度,又要减小设备尺寸,必须采取措施,以提高气隙的击穿电压。

综合前面所述影响气隙击穿电压的各种因素,提高气体击穿电压的途径有二:一是改善电场分布,使之尽量均匀;二是削弱气体间隙中的游离过程。以下分别给予介绍。

### 一、改善电场分布,使之尽量均匀

由前述可知,气体的击穿电压与间隙电场的均匀程度有着密切的关系。实验表明,随着电场不均匀程度的逐步增大,间隙的平均击穿场强也逐步由均匀电场的30kV/cm(峰值)左右逐渐减小到不均匀电场中的5kV/cm(峰值)以下。

不均匀电场的平均击穿场强之所以低于均匀电场,是由于前者在较低的平均场强下,局部的场强就已超过自持放电的临界值,形成电子崩和流注(长间隙中还有先导放电)。流注或先导通道向间隙深处发展,相当于缩短了间隙的距离,所以击穿就比较容易,所需的平均场强也就比较低。

因此,改善电场分布可以有效地提高间隙的击穿电压。一般可以采用以下几种措施。

(1) 改变电极形状。许多高压电气设备的高压引线端都具有尖锐的形状,所以增大其曲率半径是最为常见的一种方法。如在变压器套管端部加球形屏蔽罩等。同时也要改善电气设备电极的表面及其边缘状况,尽量避免毛刺及棱角等,以消除局部电场增强。近年来,随着电场数值计算的应用,在设计电极时常使其具有最佳外形,以提高间隙的击穿电压。

(2) 细线效应。由前述可知,极不均匀电场中,在一定的条件下,可利用电晕电极所产生的空间电荷来改善极不均匀电场中的电场分布,从而提高间隙的击穿电压。所谓的“细线效应”就是实际例子。比如,导线—平板或导线—导线的电极布置方式,当导线直径减小到一定程度后,气隙的工频击穿电压反而会随导线直径的减小而提高,这种现象称为细线效应。其原因就在于细线引起的电晕放电所形成的围绕细线的均匀空间电荷层相当于扩大了细线的等值半径,改善了气隙中的电场分布。

应该指出的是,细线效应只存在于一定的间隙距离范围内,而且仅在持续电压作用下才有效。

(3) 采用绝缘屏障。在极不均匀电场的棒—板间隙中,放入薄片固体绝缘材料(如纸或纸板等),在一定条件下,可以显著提高间隙的击穿电压。所采用的薄层固体材料称为屏障。因屏障极薄,屏障本身的耐电强度无多大意义,主要是屏障阻止了空间电荷的运动,造成空间电

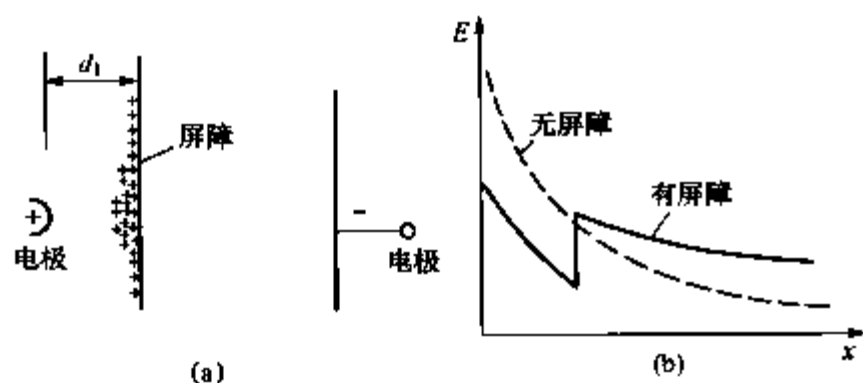


图 1-32 屏障的布置图

荷改变电场分布,从而使击穿电压提高。

通常屏障应用于正棒—负板之间,如图 1-32 所示。在间隙中加入屏障后,屏障阻止了正离子的运动,使正离子聚集在屏障向着棒的一面,且由于同性电荷相互排斥,使其比较均匀地分布在屏障上,从而在屏障前方形成了比较均匀的电场,改善了整个间隙中的电场分布,所以在正棒—负板间隙中设置屏障可以

显著提高间隙的击穿电压。

实验表明,屏障效应与外加电压类型、电极布置方式、极性及屏障的位置有关。本书就不再分别介绍了。

应该注意的是,只有在极不均匀电场中,在一定条件下应用屏障才可以提高间隙的击穿电压。因为均匀或稍不均匀电场中间隙在击穿前无显著的空间电荷积聚现象,故屏障就难以发挥作用了。

## 二、削弱气体的游离过程

### 1. 采用高气压

由巴申定律知道,提高气体压力后,气体的密度加大,减少了电子的平均自由行程,削弱了碰撞游离的发展,从而提高了间隙的击穿电压。高气压在实际中得到了广泛应用,比如早期的压缩空气断路器就是利用加压后的压缩空气作为内部绝缘的。在高压标准电容器中,也有采用压缩空气或氮气作为绝缘介质的。

在均匀电场中,压缩空气气压在  $10 \times 101.33 \text{ kPa}$  以下时,间隙击穿电压随气压的增加而成线性增加。但继续增加气压到一定值时,逐渐呈现饱和。不均匀电场中提高气压后,也可提高间隙的击穿电压,但程度不如均匀电场显著,这一点在绝缘设计时应予注意。

### 2. 采用高真空

由巴申定律知道,当气隙中压力很低(接近真空)时,击穿电压也能迅速提高。因为在这类稀薄空气的空间里,电子的自由行程非常大,但其与中性质点发生碰撞的几率几乎是零,因此不会发生碰撞游离而使真空间隙击穿。

但是,在实际采用高真空间隙作绝缘介质时,在一定条件下仍会发生放电现象。这是由不同于电子碰撞游离的其他过程决定的(放电机理已经发生变化)。实验证明,放电时真空中仍有一定的粒子流存在,这被认为是:①强电场下由阴极发射的电子自由飞过间隙,积累起足够的能量撞击阳极,使阳极物质质点受热蒸发或直接引起正离子发射;②正离子运动至阴极,使阴极产生二次电子发射,如此循环进行,放电便得到维持。

这些真空间隙的击穿机理表明,真空电极的材料及电极的表面状况对真空间隙的绝缘都是非常关键的因素。

高真空介质在电力系统中得到了普遍的应用,如真空开关、真空电容器等,特别在配电系统中其优越性尤为突出。

### 3. 采用高电气强度气体

在气体电介质中,有一些含卤族元素的强电负性气体,如六氟化硫( $\text{SF}_6$ )、氟里昂

( $\text{CCL}_2\text{F}_2$ ) 等, 因其具有强烈的吸附效应, 所以在相同的压力下具有比空气高得多的电气强度 (约为空气的 2.5~3 倍), 故把这一类气体 (或充以空气与这类气体的混合气体) 称为高电气强度气体。显然, 采用这些高电气强度气体来替代空气将大大提高气体间隙的击穿电压。

有关  $\text{SF}_6$  气体的详细特性, 我们还将第八节里作单独的介绍。

## 第七节 沿面放电与污秽放电

高压绝缘分为内绝缘与外绝缘, 所谓外绝缘是指高压设备外壳之外, 所有暴露在大气中需要绝缘的部分。外绝缘的主要部分是户外绝缘, 一般由空气间隙和各种绝缘子 (绝缘子的类型及结构已在电气设备课程中述及, 这里不再介绍) 构成。

如果加在绝缘子的极间电压超过某数值时, 常常会在绝缘子和空气的交界面上出现放电现象, 这种沿着固体介质表面发生的气体放电称为沿面放电, 沿面放电发展成电极间击穿性的放电称为闪络。沿面闪络电压不仅比固体介质本身的击穿电压低很多, 而且比纯空气间隙的击穿电压也低很多, 并受绝缘表面状态、电极形状、气候条件、污染程度等因素影响较大。电力系统中的绝缘事故绝大部分是由沿面放电所造成的。

### 一、沿面放电的一般过程

为了便于说明在同一间隙距离时, 绝缘子的闪络电压总是小于纯空气间隙的击穿电压这一现象, 我们先来分析最简单的理想均匀电场中的沿面放电。

#### 1. 均匀电场中的沿面放电

当在如图 1-33 (a) 所示的两电极间逐渐升高电压时, 我们发现放电总是沿瓷柱表面发生。而且在同样条件下, 沿瓷柱表面的闪络电压总是显著地低于纯气隙的击穿电压。这是因为:

(1) 电极和固体介质端面间可能存在微小气隙。气隙处场强比平均场强大得多, 极易发生游离, 产生的带电质点到达介质表面后会畸变原电场分布, 从而使闪络电压降低。故在实际绝缘结构中常在介质端面上喷涂金属, 将气隙短路以提高闪络电压。

(2) 介质表面的伤痕裂纹或介质表面电阻不均匀也会畸变电场分布, 降低沿面闪络电压。

(3) 固体介质表面会吸附气体中的水分, 形成水膜。

有关实验结果如图 1-34 所示。

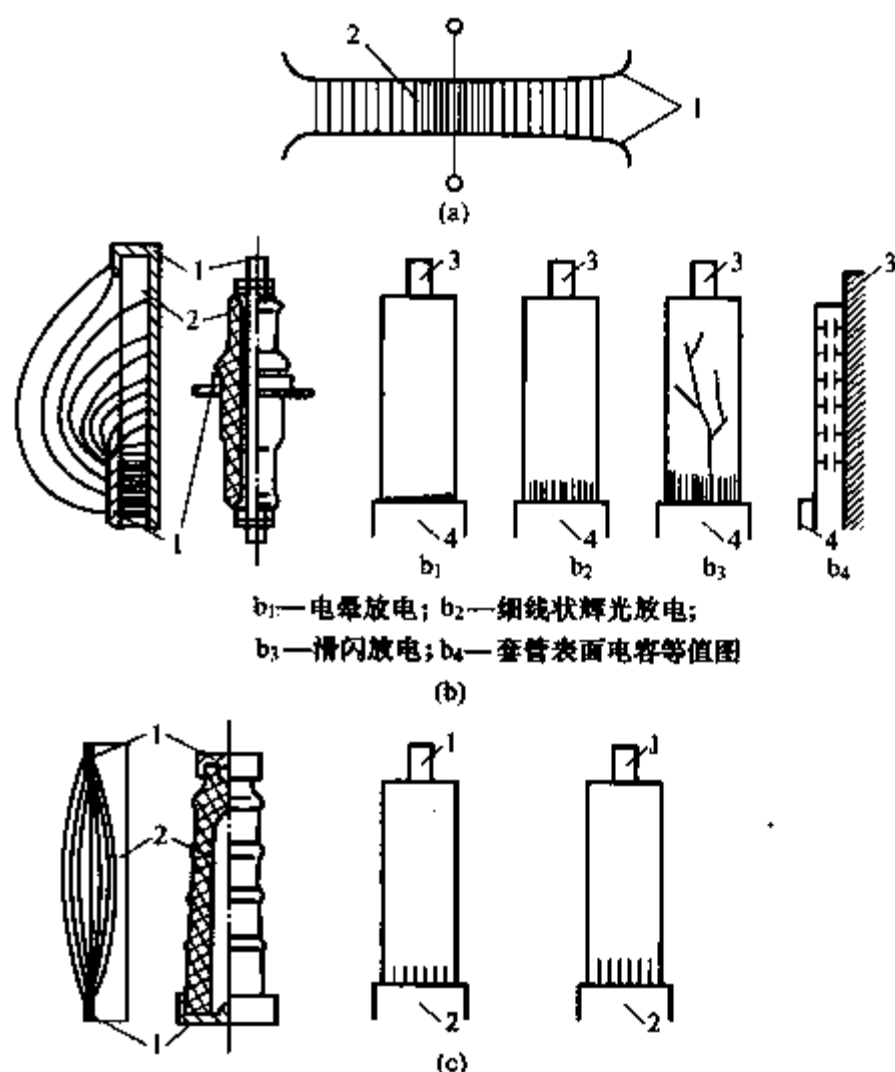


图 1-33 沿面放电的几种典型形式

(a) 均匀电场的沿面放电; (b) 强垂直分量的沿面放电;  
(c) 弱垂直分量的沿面放电

1—电极; 2—固体介质; 3—导杆; 4—法兰

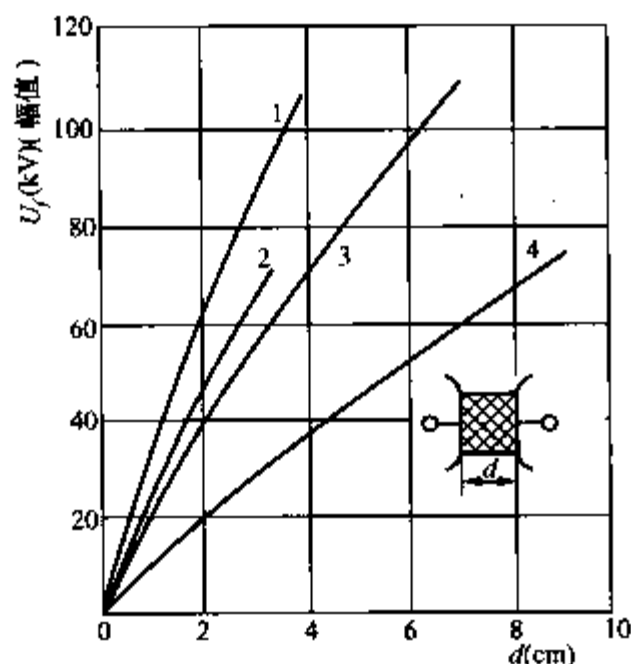


图 1-34 均匀电场中不同介质  
工频沿面闪络电压曲线  
1—纯空气间隙；2—石蜡；3—瓷；  
4—与电极接触不紧密的瓷

## 2. 极不均匀电场中的沿面放电

实际上，工程中各种电极形状

所构成的电场大多属于极不均匀电场，它们的沿面放电过程可分为如图 1-33 (b)、(c) 所示的两种情况来讨论。

(1) 强垂直分量的沿面放电。高压套管就属于这种情况，下面分析其沿面放电过程，如图 1-33 (b) 所示。

从图中所示的电场分布可以看出，套管法兰附近的  $E$  线最密，电场最强，所以当所加电压还不太高时，此处就出现淡淡的发光圈，称为电晕放电。随着外加电压的升高，放电逐渐变成由许多平行的火花细线组成的光带，称为辉光放电。由于线状火花通道中的电阻值较高，故其中的电流密度较小，压降较大。当电压超过某一临界值后，个别火花细线会突然迅速伸长，转变为较明亮的浅紫色的树枝状火花，而且在不同的位置交替出现，并伴有轻微的爆裂声，称为滑闪放电。它是高压套管沿面放电的一种特有放电形式。滑闪放电通道中的电流密度已较大，这时外加电压微小的升高，就会导致放电火花有较大的增长。当放电火花延伸到另一电极时即造成套管的闪络。

上述现象也可用图 1-35 所示的等值电路加以解释。当在套管导电杆  $T$  与法兰  $F$  两端加上工频电压时，沿套管表面  $D$  将有电流流过，但由于  $C_0$  及  $G_r$  的分流作用，使得沿套管表面  $D$  的电流不相等，越靠近法兰  $F$  处的表面电流越大，单位距离上的压降也越大，电场也越强，故  $F$  处的电场最强。当其电场大到足以造成气体游离的数值时，该段固体介质表面的气体即发生游离，产生大量的带电质点，它们被很强的电场法线分量紧压在介质表面上运动，从而使介质表面局部温度升高。当局部温升引起气体分子的热游离时，火花通道中的带电质点剧增，电阻骤减，火花通道头部的场强变大，火花通道迅速向前延伸，即形成滑闪放电。故滑闪放电是以气体分子的热游离为特征的，而且只发生在具有强垂直分量的极不均匀电场中。

从图 1-35 中不难看出，若固体介质的体积电容  $C_0$  越大，体积电导  $G_r$  越大，沿介质表面的电压分布就越不均匀，其沿面闪络电压也就越低；若外加电压的变化速度越快，频率越高，分流作用就越强，电压分布就越不均匀，沿面闪络电压也就越低。

因此为了提高套管的闪络电压，可以采取以下的措施：①减小套管的体积电容，调整其表面的电位分布，如增大固体介质的厚度，特别是加大法兰处套管的外径，也可采用介电常数较小的介质；②适当减小绝缘表面电阻，如在套管靠近法兰处涂半导体漆或半导体釉，可以使沿面的最大电位梯度减小，防止滑闪放电的出现。使电压分布变得均匀；③在瓷套的内

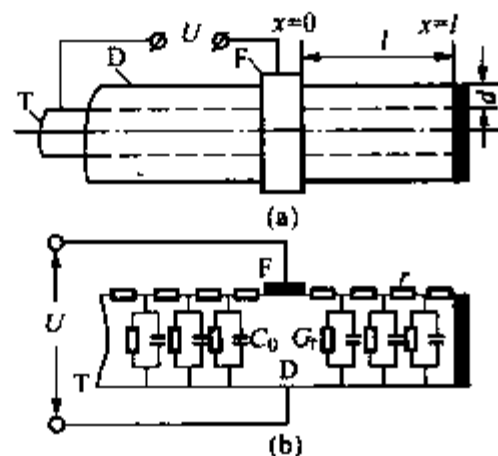


图 1-35 高压实心套管的等值电路  
(a) 外形图；(b) 等值电路

壁上喷铝，以消除气隙两端的电位差，防止空气隙在强电场下出现游离放电现象。

由于滑闪放电现象与介质体积电容及电压变化的速度有关，故在工频交流和冲击电压作用下，可以明显的看到滑闪放电现象。而在直流电压作用下，则不会出现明显的滑闪放电现象。在直流电压作用下，介质的体积电容对沿面放电的发展基本上没有影响，因而沿面闪络电压接近于纯空气间隙的击穿电压。

应当指出的是，套管的工频沿面闪络电压并不正比于套管的长度，前者的增大要比后者的增长慢得多。这是由于套管长度增加时，通过固体介质体积内的电容电流和泄漏电流将随之有很快的增大，使沿面电压分布的不均匀性进一步增强。

(2) 弱垂直分量的沿面放电。支柱绝缘子就属于这种情况。下面分析其沿面放电过程，如图 1-33 (c) 所示。

由于支柱绝缘子本身的电极形状和布置已经使电场分布很不均匀了，其沿面闪络电压较低（与均匀电场相比），因而介质表面积聚电荷使电压重新分布所造成的电场畸变，不会显著降低沿面闪络电压。

此外，因电场的垂直分量较小，沿介质表面也不会有较大的电容电流流过，放电过程中不会出现热游离，故不会出现明显的滑闪放电，垂直于放电发展方向的介质厚度对沿面闪络电压实际上没有影响。因此为提高此类绝缘子的沿面闪络电压，一般从改进电极形状以改善电极附近的电场着手。如采用内屏蔽或采用外屏蔽电极（如屏蔽罩和均压环等）。

## 二、悬式绝缘子串的电压分布

我国 35kV 及以上的高压线路大多使用由盘形悬式绝缘子组成的绝缘子串作为线路绝缘。绝缘子串中绝缘子片数的多少决定了线路的绝缘水平。

悬式绝缘子串由于绝缘子的金属部分与接地铁塔或带电导线间存在电容，使绝缘子串的电压分布不均匀。为了说明这个问题，可以用图 1-36 (c) 所示的等值电路来分析。图中  $C$  为绝缘子本身的电容， $C_E$  为绝缘子金属部分对地（铁塔）的电容， $C_L$  为绝缘子金属部分对导线的电容。一般  $C$  为 50~75pF， $C_E$  为 3~5pF， $C_L$  为 0.3~1.5pF（若采用分裂导线则有所增大）。

如果只考虑  $C_E$ ，则等值电路如图 1-36 (a) 所示，显然由于  $C_E$  的分流，将使靠近导线端的绝缘子流过的电流最多，从而该处的电压降也最大。

如果只考虑  $C_L$ ，则等值电路如图 1-36 (b) 所示。同样可知，由于各个  $C_L$  分流的电流将使靠近铁塔端的绝缘子流过的电流最大，从而使该处的电压降也最大。

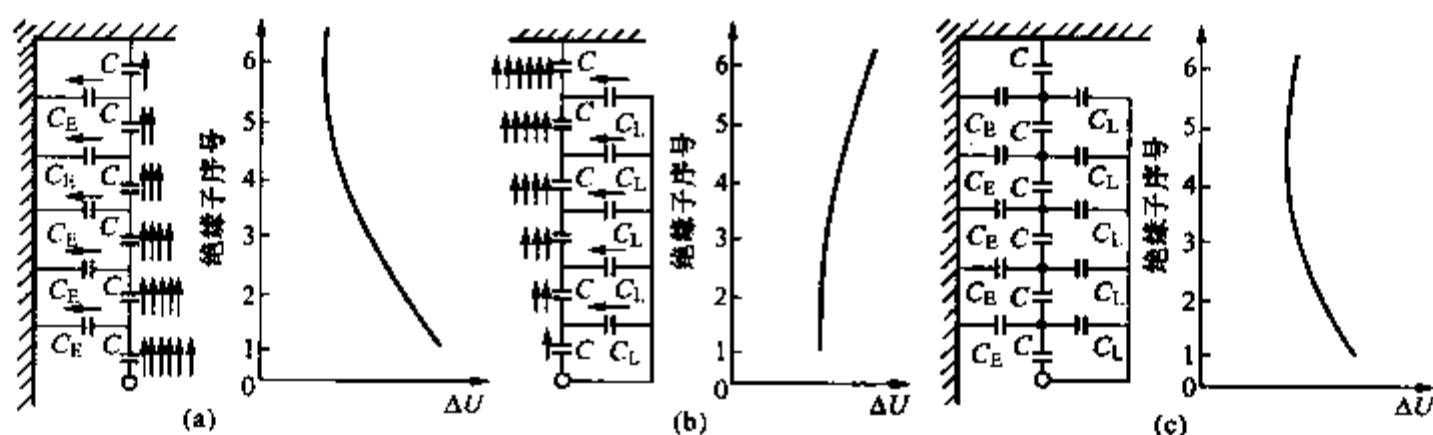


图 1-36 悬式绝缘子串的等值电路及其电压分布曲线

(a) 只考虑对地电容  $C_E$ ; (b) 只考虑对导线电容  $C_L$ ; (c) 同时考虑  $C_E$  和  $C_L$

实际上  $C_E$  及  $C_L$  同时存在, 各绝缘子上承受的电压分布如图 1-36 (c) 所示。由于  $C_E > C_L$ , 即  $C_E$  的影响比  $C_L$  大, 所以绝缘子串中靠近导线端的绝缘子承受的电压降最大, 离导线端远的绝缘子电压降逐渐减小。当靠近铁塔横担时,  $C_L$  的作用显著, 电压降又有些升高。

随着输电电压的提高, 绝缘子片数越来越多, 绝缘子串上的电压分布越来越不均匀, 靠近导线端第一个绝缘子上的电压降最高, 当其电压达到电晕起始电压时, 常常会产生电晕。为了改善绝缘子串的电压分布, 通常在绝缘子串的导线端安装均压环, 以增大  $C_L$  而起到补偿  $C_E$  的作用。此外, 超高压输电线路广泛采用的分裂导线 (此时  $C_L$  有所增大), 也有利于绝缘子的电压分布不均匀程度的有所减小。

通常, 对 330kV 及以上电压等级的线路才考虑使用均压环。在工程实际中, 类似于悬式绝缘子串电压分布不均匀的例子还很多。如变电站中的避雷器由多个元件组成, 为了改善其电压分布常常也加装均压环。

### 三、绝缘子的干闪与湿闪

高压线路绝缘子在日常运行时, 要在不同的大气条件下正常的工作, 如天气晴朗、下雨、大雾、雷雨季节、脏污地区、沿海地区、平原和高海拔地区等条件下, 所有各种情况, 都要求高压线路绝缘子具有一定的绝缘水平以保证供电的可靠性。所以要对绝缘子进行各种电气性能的试验。

绝缘子的电气性能常用闪络电压来衡量, 根据工作条件的不同, 闪络电压通常分为干闪电压、湿闪电压和污闪电压 (下面将做专门的介绍) 三种。干闪电压是指表面清洁而且干燥时绝缘子的闪络电压, 它是户内绝缘子的主要性能。湿闪电压是指洁净的绝缘子在淋雨情况下的闪络电压, 它是户外绝缘子的主要性能。这里就介绍在淋雨状态下高压绝缘子的沿面放电。

如图 1-37 所示的人工淋雨试验中, 为了防止在淋雨情况下整个绝缘子表面都被雨水淋湿, 设计时都将绝缘子的形状做成伞裙状, 通常伞裙突出主干直径的宽度与伞间距离之比为 1:2。为了增大沿面闪络距离, 在绝缘子下表面往往还做成几个凸起的棱。这样在淋雨时, 只会在绝缘子 (串) 的上表面形成一层不均匀的导电的水膜, 而下表面仍保持干燥状态, 绝大部分电压将由干燥的表面所承受。

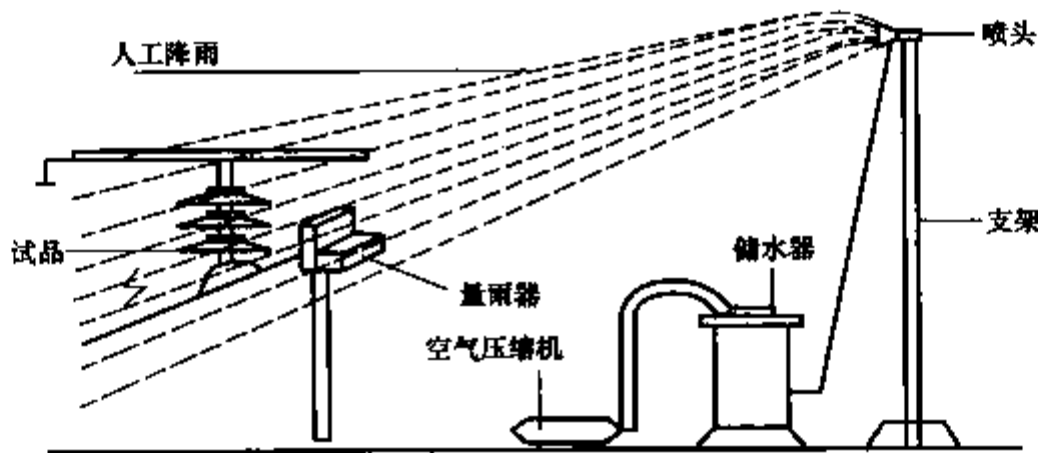


图 1-37 人工雨模拟绝缘子湿闪装置示意图

在工频电压作用下, 当绝缘子不长时, 其湿闪电压显著低于干闪电压 (约低 15%~20%)。由于在淋雨情况下沿绝缘子串上的电压分布 (主要按电导分布) 比较均匀, 故绝缘子串的湿闪电压也基本上按绝缘子串长度的增加而线性增加; 另一方面, 由于干燥情况下的绝缘子串上的电压分布不均匀, 绝缘子串的干闪电压梯度将随绝缘子串长度的增加而下降。这

样，随着绝缘子串长度的增加，湿闪电压将会逐渐接近其干闪电压，以致超过干闪电压，两者的比较如图 1-38 所示。

#### 四、绝缘子的污闪

##### 1. 污闪的危害性

环境污染问题严重影响着人类的日常生活，同时也严重影响着包括电力在内的工农业生产。在户外运行的绝缘子，常会受到工业污秽或盐碱、飞尘等的污染。在干燥情况下，这种污秽物电阻很大，对运行没什么大的影响。但在大气湿度较高，特别是在毛毛雨、雾、凝露、融雪、融冰等不利的天气条件下，绝缘子表面的污秽物被润湿，表面电导和泄漏电流剧增，闪络电压明显降低，甚至可以在工作电压下发生闪络。由这种闪络所造成的事故称为污闪事故。

污闪事故虽然不像雷害事故那样频繁，但由污闪所造成的损失要比雷害大得多。这是因为诱发污闪的条件（如污秽层、雾、雨、雪等）往往长期而广泛地存在，如果采用重合闸措施，污闪处的电弧有可能重燃，甚至使绝缘子炸裂，故污闪事故重合闸的成功率是极低的。因此，污闪事故一旦发生，往往会造成大面积长时间停电，迄今依然是威胁电力系统安全运行的最危险事故之一。我国输变电外绝缘仍存在很多薄弱环节，在恶劣气象条件下，往往经不起考验。如 1990 年，华北电网发生大面积污闪；1996 年，华东电网发生大面积污闪；2001 年春，辽宁、华北和河南电网又发生大面积污闪事故。

污秽绝缘水平已成为选择超（特）高压系统外绝缘水平的决定性因素。直流下，污闪问题更为严重，成为直流输电中的几大难题之一。我国的防污闪工作依然任务艰巨，任重道远。

##### 2. 污闪放电的基本过程

污闪是一个非常复杂的过程，至今对它形成机理的研究还很粗糙。故本书只作概述性的介绍（以盘型悬式绝缘子为例）。

（1）绝缘子表面积污。绝缘子表面积污是一个很复杂的过程，污秽度不仅与积污量有

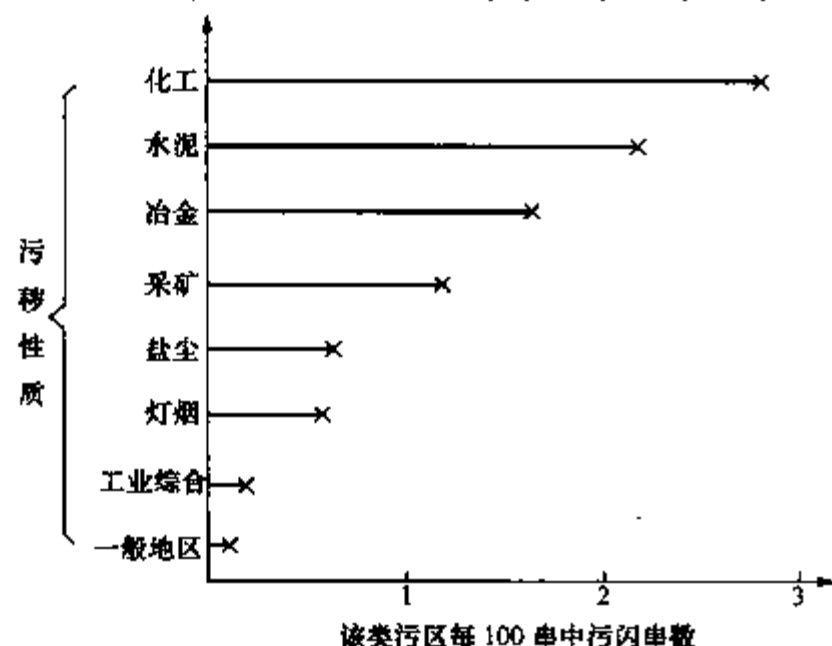


图 1-39 污闪跳闸与污秽性质的关系

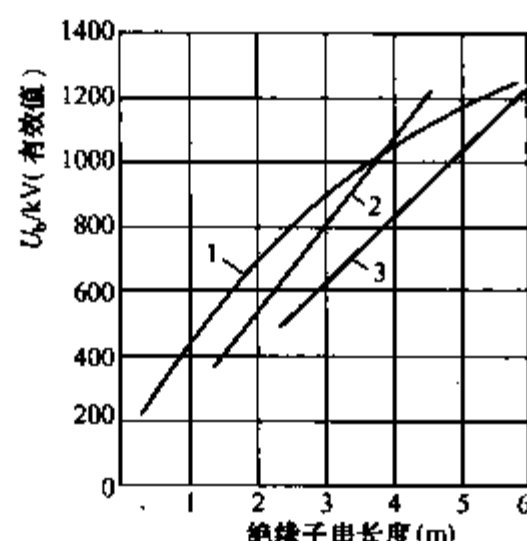


图 1-38 悬式绝缘子串湿闪电压和干闪电压的比较

1—干闪电压；2—湿闪电压（IIIM—4.5）；  
3—湿闪电压（IIIM—8.5）

关，而且与污秽的化学成分有关。图 1-39 所示是我国某地区污闪跳闸与污秽性质的关系的统计图。

为了模拟自然界中的污秽，通常可用“等值附盐密度”（ESDD，简称“等值盐密”）来表征绝缘子表面的污秽程度。等值盐密法，就是将绝缘子表面的污秽物密度转化为相当于每平方厘米含多少毫克的 NaCl 的表示方法，一般为  $0.2 \sim 0.4 \text{ mg/cm}^2$ 。我国国家标准规定的污秽等级及其对应的等值盐密值如表 1-1 所示。

表 1-1 线路和发电厂、变电站污秽等级 (GB/T 16434—1996)

污秽等级	污湿特征	盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	
		线路	发电厂、变电站
0	大气清洁地区及离海岸盐场 50km 以上无明显污染地区	≤0.03	—
I	大气轻度污染地区，工业区和人口低密集区，离海岸盐场 10~50km 地区。在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）或雨量较多时	>0.03~0.06	≤0.06
II	大气中度污染地区，轻盐碱和炉烟污秽地区，离海岸盐场 3~10km 地区，在污闪季节中潮湿多雾（含毛毛雨）但雨量较少时	>0.06~0.10	>0.06~0.10
III	大气污染较严重地区，重雾和重盐碱地区，离海岸盐场 1~3km 地区，工业与人口密度较大地区，离化学污染源和炉烟污秽 300~1500m 的较严重污秽地区	>0.10~0.25	>0.10~0.25
IV	大气特别严重污染地区，离海岸盐场 1km 以内，离化学污染源和炉烟污秽 300m 以内的地区	>0.25~0.35	>0.25~0.35

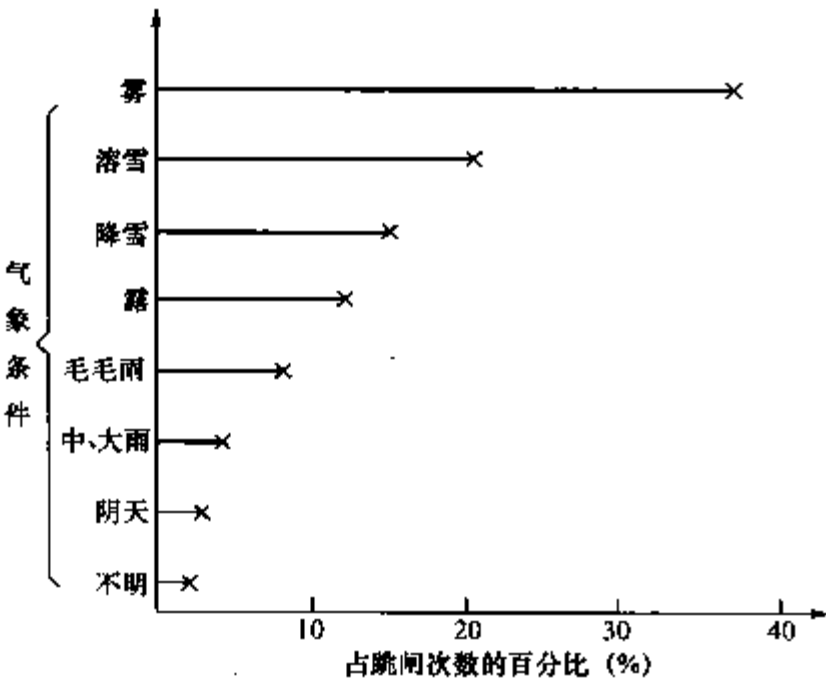


图 1-40 污闪跳闸随气象条件的分布

(2) 污层的湿润。当绝缘子表面积污后，如果又有合适的湿润条件时，染污绝缘表面变成导电层，表面绝缘能力下降。空气中的水分有各种各样的形式：如下大雨、中雨、小雨、毛毛雨，还有雾、露、雪等。经大量的测试表明，以雾的威胁最为严重。图 1-40 是我国某地区污闪跳闸与气象条件的关系的统计图。

(3) 局部电弧的产生与发展。当绝缘子积污和湿润以后，在运行电压作用下，污秽放电的过程大致如下：流过绝缘子表面的泄漏电流增大，产生焦耳热

使水分蒸发。在电流密度大、污层电阻高的局部区域（如铁脚周围）热效应较显著，污层可能被烘干，形成干区。干区隔断了泄漏电流，使作用电压集中于干区两端而形成高场强，引起空气碰撞游离，在铁脚周围出现局部放电现象。这种局部放电具有不稳定、时断时续的性质（有时也称之为闪烁放电）。于是，大部分泄漏电流经闪络放电的通道流过，很容易使之形成局部电弧（其间可能会持续出现熄灭—重燃或延伸—收缩的交替变化过程）。

干区上出现的局部放电（负伏安特性）与未烘干的污层电阻（正伏安特性）相串联，当局部电弧延伸到某一临界长度时，弧道温度已很高，弧道的进一步伸长就不再需要更高的电压，而由热游离予以维持（表面电弧能自动延伸）。最后将导致电弧贯通绝缘子两极，从而造成污闪事故。

从上述可知，在污秽放电过程中，局部电弧不断延伸直至贯通两极所需的外加电压只要维持弧道就够了，而不必像干闪需要很高的电场强度来使空气发生激烈的碰撞游离才能出

现。这就是为什么污闪电压要比干闪和湿闪电压低得多的原因。

3. 防污闪措施

在规划设计时，应尽量使高压输电线路远离污秽区，避免在污秽地区建设发变电站，并遵循表 1 - 2 所规定的各级污区应有的爬电比距值  $\lambda$ 。

表 1 - 2 各污秽等级所要求的爬电比距值  $\lambda$

污秽等级	爬电比距 (cm/kV)			
	线 路		发电厂、变电站	
	$\leq 220\text{kV}$	$\geq 330\text{kV}$	$\leq 220\text{kV}$	$\geq 330\text{kV}$
0	1.39 (1.60)	1.45 (1.60)	—	—
I	1.39~1.74 (1.60~2.00)	1.45~1.82 (1.60~2.00)	1.60 (1.84)	1.60 (1.76)
II	1.74~2.17 (2.00~2.50)	1.82~2.27 (2.00~2.50)	2.00 (2.30)	2.00 (2.20)
III	2.17~2.78 (2.50~3.20)	2.27~2.91 (2.50~3.20)	2.50 (2.88)	2.50 (2.75)
IV	2.78~3.30 (3.20~3.80)	2.91~3.45 (3.20~3.80)	3.10 (3.57)	3.10 (3.41)

注 括号内的数据为以系统额定电压为基准的爬电比距值。

表中的爬电比距  $\lambda$  是指绝缘子的“相对地”之间的爬电距离与系统最高工作线电压有效值的比值 (cm/kV)，用它来表征绝缘子的耐污水平。表中的爬电比距值  $\lambda$  是以大量的实际运行经验为基础而规定出来的，故一般只要遵循规定的爬电比距值来选择绝缘子串的总爬距和片数，即可保证必要的运行可靠性。

在运行维护时，可采取以下措施：

(1) 加强清扫或采取带电水冲洗的办法。

(2) 增加爬距。措施有二：一是改进绝缘子结构，使大风和下雨时容易自行清扫，降低污染，即采用所谓的防污型绝缘子以增大泄漏距离；二是增加绝缘子片数，此办法会增加绝缘子串长度，从而减小了风偏时的空气距离，为此可采用 V 型串来固定导线。

(3) 采用新型的合成绝缘子。这种新型绝缘子近年来发展很快，其防污性能比普通的瓷绝缘子要好得多。如图 1 - 41 所示，合成绝缘子是由承受外力负荷的芯棒（兼内绝缘）和保护芯棒免受大气环境侵袭的伞套（外绝缘）通过粘接层组成的复合结构绝缘子。玻璃钢芯棒是用玻璃纤维束浸渍树脂后通过引拔模加热固化而成，具有极高的抗拉强度。

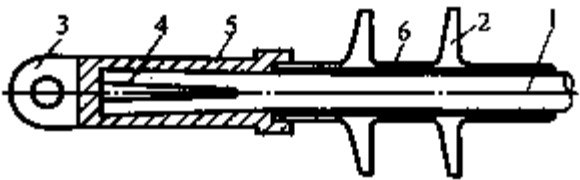


图 1 - 41 棒型合成绝缘子的结构示意图  
1—芯棒；2—护套；3—金属附件；4—楔子；  
5—粘接剂；6—填充层

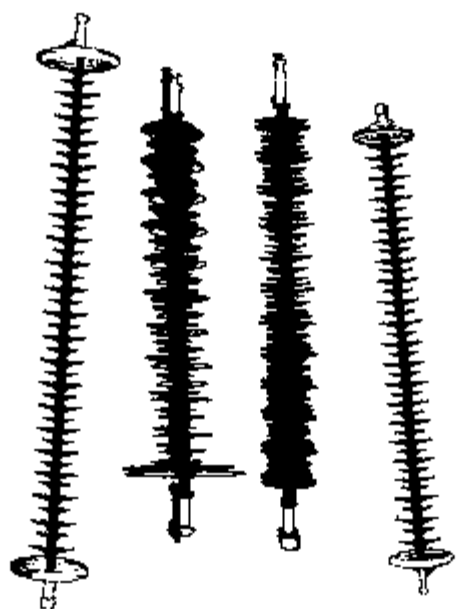


图 1-42 硅橡胶合成绝缘子的外形图

伞套是由硅橡胶一次注塑而成，具有很高的电气强度、很强的憎水性和很好的耐局部电弧性能。由于硅橡胶是憎水性材料，因此在运行中不需清扫，其污闪电压比瓷绝缘子高得多。除优良的防污闪性能外，合成绝缘子又以质量轻、体积小、抗拉、抗弯、防爆性强而著称，所以又称为轻型绝缘子。目前合成绝缘子已经大量生产，并在电力系统中得到了广泛的应用。硅橡胶合成绝缘子的外形图如图 1-42 所示。

(4) 在绝缘子表面涂憎水性涂料。涂上憎水性涂料后，污层中不易形成连续的导电水膜，抑制了泄漏电流，从而提高了沿面闪络电压。比如 RTV 涂料就是一种长效防污涂料，其寿命大大超过一般涂料（如硅油、地蜡等）。

## 第八节 $\text{SF}_6$ 气体的绝缘特性

$\text{SF}_6$  气体是除空气以外应用最为广泛的气体介质。目前  $\text{SF}_6$  气体不仅广泛应用于高压断路器、高压电缆、高压电容器、高压互感器、高压套管等电气设备中，还被广泛应用于各种组合电气设备中，如全封闭组合电器或全封闭气体绝缘变电站（GIS）中。这些组合设备具有很多优点，可大大缩小占地空间，简化运行维护等。

### 一、 $\text{SF}_6$ 气体的理化特性

$\text{SF}_6$  气体是一种无色、无味、无臭、无毒，不燃的不活泼气体，化学性能非常稳定，对金属及绝缘材料无腐蚀作用，液化温度较低。

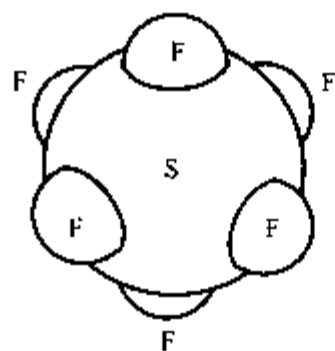


图 1-43  $\text{SF}_6$  的分子结构

$\text{SF}_6$  分子具有很强的电负性，容易吸附电子变为负离子。另外，它们的分子量和分子直径比较大，使得电子在其中的平均自由行程缩短，因此游离过程大大削弱，同时也加强了带电质点的复合过程。

$\text{SF}_6$  分子中，六个氟原子与中心的一个硫原子相互以共价键结合，如图 1-43 所示，其键距小，键能高，所以其化学稳定性很高。仅当温度很高（ $>1000\text{K}$ ）时， $\text{SF}_6$  气体才发生热离解。 $\text{SF}_6$  气体的缺点是：放电时  $\text{SF}_6$  气体会发生分解，形成硫的低氟化物，当气体中含有水分时，这些低氟化物还会与水发生继发性反应，生成对绝缘材料和金属材料腐蚀性很强的  $\text{HF}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$  之类的物质。

### 二、 $\text{SF}_6$ 气体的绝缘特性

#### 1. 极不均匀电场中 $\text{SF}_6$ 气体的击穿

研究表明， $\text{SF}_6$  气体虽然具有很高的绝缘强度，但与空气相比呈现出较为复杂的绝缘特性，尤其是对极不均匀电场的绝缘。主要体现在：

(1)  $\text{SF}_6$  气体的击穿电压对电场的均匀程度比空气敏感得多，电场不均匀程度越高， $\text{SF}_6$  间隙的平均击穿场强将剧烈下降。

(2) 对空气，电场越不均匀，提高气压对提高气隙击穿电压的作用越小；对  $\text{SF}_6$  气体，这种倾向更为突出，且在一定的气压区域，气隙的击穿电压与气压的关系存在异常的低谷。

(3) 在极不均匀电场中, 当外加电压远小于击穿电压时, 就已发生稳定的局部放电。如前所述, 这会使  $\text{SF}_6$  气体离解。离解物和继发性反应物有很大的腐蚀性, 对绝缘的危害很大, 而空气游离时则不然。

由于上述原因, 在进行充  $\text{SF}_6$  气体的绝缘结构设计时, 应尽可能避免极不均匀电场的情况。 $\text{SF}_6$  气体间隙的绝缘结构大都采用同轴圆柱结构, 导体拐弯部分应制成圆弧形, 以保证间隙电场尽可能均匀, 如图 1-44 所示。

此外, 气隙的极性效应也与空气隙相反, 即曲率半径较小的电极为负极性时气隙的击穿电压反而小于正极性, 所以  $\text{SF}_6$  气体绝缘结构的绝缘水平是由负极性电压决定的。研究还表明, 与空气隙相比,  $\text{SF}_6$  气隙的伏秒特性在短时 ( $t < 5\mu\text{s}$ ) 范围内上翘较少。所以, 用避雷器来保护具有  $\text{SF}_6$  气体绝缘的设备时, 应特别注意在上述短时范围内的配合。

## 2. 均匀电场中 $\text{SF}_6$ 气体的击穿

由上所述可知,  $\text{SF}_6$  气体优异的绝缘性能只有在比较均匀的电场中才能得到充分的发挥。所以在  $\text{SF}_6$  气体的间隙中任何局部区域出现自持放电, 就会导致整个间隙的击穿。于是,  $\text{SF}_6$  气体的击穿电压, 就决定于该条件下  $\text{SF}_6$  气体本身的耐电场强了。

研究表明, 均匀电场中  $\text{SF}_6$  气体的击穿特性同样遵从巴申定律。只是由于其强烈的吸附效应, 在碰撞游离过程中, 电子碰撞游离系数  $\alpha$  将大打折扣, 折扣率可用电子附着系数  $\eta$  来表示。 $\eta$  表示一个电子逆着电场方向运动 1cm 的行程中所发生的电子附着次数的平均值。因此, 在  $\text{SF}_6$  气体中的有效碰撞游离系数应为

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \quad (1-19)$$

对于  $\text{SF}_6$  气体, 其击穿电压的经验计算公式为

$$U_b = 88.5pd + 0.38 \quad (1-20)$$

式中  $U_b$ ——击穿电压, kV;

$p$ ——气压, MPa;

$d$ ——气隙距离, mm。

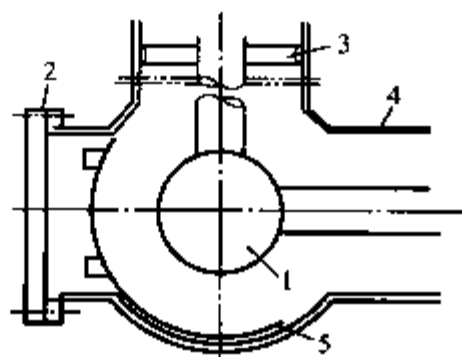


图 1-44 420kV  $\text{SF}_6$  单相电缆直角拐弯结构

1—导杆连接球; 2—安装盖; 3—加固环;

4—外壳; 5—球罩

## 3. $\text{SF}_6$ 气体中的沿面放电

$\text{SF}_6$  电气设备中, 为固定高压导体需固体绝缘支持物, 如图 1-45 所示。这就出现了  $\text{SF}_6$  气体中沿固体介质表面放电的问题。

与空气中的闪络相似, 影响  $\text{SF}_6$  气体沿面放电电压的因素主要有电场均匀程度、固体介质表面的粗糙程度和绝缘表面状况等。

研究表明: 在  $\text{SF}_6$  气体沿面绝缘结构设计中, 电场分布应尽量均匀, 否则即使增加沿面距

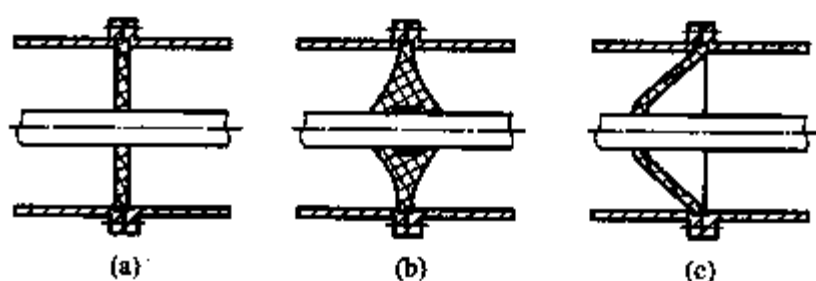


图 1-45  $\text{SF}_6$  电缆中使用的典型绝缘子

(a) 圆板形; (b) 盘形; (c) 锥形

离, 闪络电压也提高很少。若固体介质表面粗糙, 则场强会在微观范围内发生变化而降低沿面闪络电压。在  $\text{SF}_6$  气体中若电介质表面脏污、受潮, 闪络电压也会明显降低, 所以应选用抗腐蚀性能强的绝缘材料, 工艺上应注意清洁, 加强密封, 严格控制充入设备的  $\text{SF}_6$  中的含水量。此外, 还可在充  $\text{SF}_6$  气体的电气设备内放置吸附剂, 以吸附所产生的氟化物和水分。

## 小 结

气体中带电质点的产生依靠游离, 主要形式有碰撞游离、光游离、热游离和金属表面游离。平均自由行程是影响碰撞游离能力的一个重要参数。气体中带电质点消失的主要形式有漂移、扩散、复合和吸附效应。

汤逊放电理论与流注放电理论的主要区别有: ①适用范围不同; ②形成自持放电的主要因素不同; ③前者可定量分析, 而后者只能做定性分析。

不均匀电场的间隙击穿前存在明显的电晕放电; 不对称间隙中放电存在极性效应; 长间隙击穿过程中存在先导阶段。防止电晕的最根本措施是增大电极的曲率半径。

为了描述在冲击电压作用下的气体放电特性, 需要引入一些新概念, 如  $U_{50\%}$ 、冲击系数  $\beta$ 、伏秒特性等。在绝缘配合中必须考虑被保护设备与保护设备之间伏秒特性的配合。

均匀或稍不均匀电场中的气隙伏秒特性曲线较为平坦, 故在不同电压形式下, 其击穿电压是相同的。极不均匀电场中的气隙伏秒特性曲线较为陡峭, 故在不同的电压形式下其击穿特性不同。

大气状态对气隙击穿电压的影响可以通过校正公式统一换算到标准大气状态下气隙的击穿电压, 以便于相互比较并作出一致性评价。

提高气体击穿电压的途径有: 一是改善电场分布, 使之尽量均匀; 二是削弱气体的游离过程。

闪络电压总是小于同间隙的气体的击穿电压。在交流电压作用下, 高压套管的沿面放电往往是由“滑闪放电”引起的, 而支柱绝缘子不会出现滑闪放电, 这是由于两者的电场分布特点不同所造成的。

由于绝缘子串对地及对导线存在杂散电容, 使得工频电压作用下沿绝缘子串的电场分布很不均匀, 一般呈“U”形分布曲线。靠近导线端的绝缘子承担的电压最高。

绝缘子的闪络电压分为干闪电压、湿闪电压与污闪电压。一般地, 干闪电压大于湿闪电压, 湿闪电压大于污闪电压。污闪事故通常在绝缘子受到污染, 并处于一些不利气候条件(如雾、毛毛雨、露、融雪等)下时发生。污闪的产生过程非常复杂, 目前对它的认识还比较粗糙。防污闪措施主要是从绝缘子的防污、防潮或增大爬距等途径来实现的。

$\text{SF}_6$  气体以其具有强烈的吸附效应而成为高电气强度气体, 所以在电力系统中得以广泛的应用。不过,  $\text{SF}_6$  气体的优良绝缘性能只有在均匀电场中才能得以充分发挥。 $\text{SF}_6$  气体气隙的极性效应与空气相反。充  $\text{SF}_6$  气体的电气设备对水分及杂质的控制要求非常严格。

## 习 题

1-1 什么是吸附效应? 为什么把负离子的形成也看作是一种去游离因素?

1-2 解释巴申曲线为什么会有最小值？在什么情况下气体放电不遵循巴申定律？

1-3 分析比较均匀电场与不均匀电场气隙的击穿特性有何不同？

1-4 为什么要对气隙的击穿电压进行大气条件校正？高海拔地区的高压输电线路与平原地区相同电压等级的线路相比，为什么前者的线间距离要大，而且绝缘子串中的绝缘子片数也要多？

1-5 为什么应避免  $\text{SF}_6$  气体在极不均匀电场中使用？

## 第二章 液体、固体电介质的电气性能

工程上应用的电介质按物态来分,可分为气态、液态和固态三大类;按化学结构来分,可分为非极性及弱极性电介质、偶极性电介质和离子性电介质三类。

非极性电介质是由非极性分子(即分子正、负电荷中心重合)或弱极性分子组成的电介质,如氮气、聚四氟乙烯、聚苯乙烯等;偶极性电介质是由极性分子(分子正、负电荷中心不重合)组成的电介质,如聚氯乙烯、蓖麻油、纤维素等;离子性电介质是由正、负离子组成的,只有固体形式(固体无机化合物),如石英、电瓷等。这些电介质在电场作用下的电气特性可用极化、电导、损耗及击穿来表征。一般气体电介质的极化、电导和损耗都很微弱,可忽略不计,需要注意的是液体和固体电介质的这些特性。

### 第一节 电介质的极化、电导和损耗

#### 一、电介质的极化及相对介电常数

##### 1. 极化的定义

电介质在电场中所发生的束缚电荷的弹性位移及偶极子的转向现象,称为电介质的极化。

##### 2. 电介质的相对介电常数

我们知道,平行板电容器的电容量  $C$  与平板电极的面积  $A$  成正比,而与平板电极间的距离  $d$  成反比,其比例常数取决于介质的特性。

设平行板电容器在真空中的电容量为

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2-1)$$

式中  $A$  极板面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $d$  极间距离,  $\text{m}$ ;

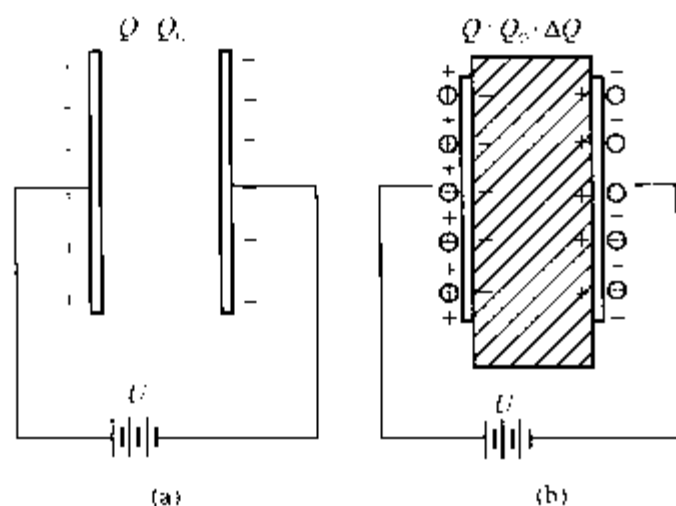


图 2-1 电介质的极化  
(a) 极间为真空; (b) 极间有介质

$\epsilon_0$  真空的介电常数,  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m}$ 。

此时若在极板上施加直流电压  $U$ , 如图 2-1 (a) 所示, 则两极板上分别充上正、负电荷。设其电荷量为  $Q_0$ , 则有

$$Q_0 = C_0 U \quad (2-2)$$

当平板电极间插入介质后, 如图 2-1 (b) 所示, 其电容量增为

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2-3)$$

式中  $\epsilon$  为介质的介电常数。

在相同直流电压  $U$  的作用下, 由于介质的极化, 使介质表面出现了与极板电荷异号的束缚电荷, 电荷量为  $\Delta Q$ , 相应的要从电源再吸取等量的异性电荷到极板上, 极板上的电荷量变为  $Q$ , 则有

$$Q = Q_0 + \Delta Q = CU \quad (2-4)$$

对于同一平行板电容器, 放入的介质不同, 介质极化的程度也不同, 表现为极板上的电荷量  $Q$  不同, 于是  $Q/Q_0$  就反映了在相同条件下不同介质极化现象的强弱, 则有

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{CU}{C_0 U} = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon \frac{A}{d}}{\epsilon_0 \frac{A}{d}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r \quad (2-5)$$

$\epsilon_r$  称为电介质的相对介电常数, 它是表征电介质在电场作用下极化现象强弱的指标。其值由电介质本身的材料决定。气体分子间的距离很大, 密度很小, 气体的极化率很小, 因此各种气体的  $\epsilon_r$  都接近 1。常用液体、固体电介质的  $\epsilon_r$  一般在 2~10 之间。各种电介质的  $\epsilon_r$  与温度、电源频率的关系也各不相同, 这与极化的形式有关。

### 3. 极化的基本形式

(1) 电子位移极化。如图 2-2 所示, 电介质中的原子、分子或离子中的电子在外电场的作用下, 使电子轨道相对于原子核产生位移, 从而形成感应电矩的过程, 称为电子位移极化。

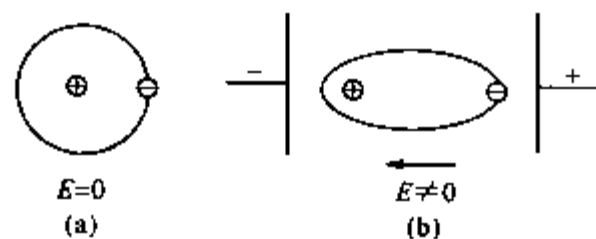


图 2-2 电子位移极化

(a) 无外加电场; (b) 有外加电场

电子位移极化的特点为:

- 1) 存在于一切电介质中。
- 2) 由于电子质量很小, 极化建立所需时间极短, 约  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ s}$ 。因此, 这种极化在各种频率的交变电场中均能发生, 即  $\epsilon_r$  不随频率的变化而变化。
- 3) 极化程度取决于电场强度  $E$ , 由于温度不足以引起质点内部电子能量状态的变化, 所以温度对此种极化的影响极小。
- 4) 极化是弹性的, 去掉外电场, 极化可立即恢复, 极化时消耗的能量可以忽略不计, 因此也称之为“无损极化”。

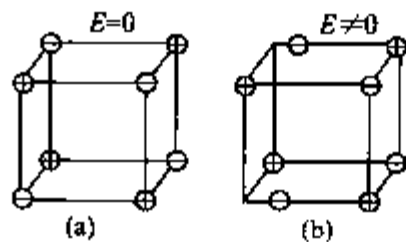


图 2-3 离子位移极化

(a) 无外加电场;

(b) 有外加电场

(2) 离子位移极化。在由离子结合成的电介质中, 外电场的作用使正、负离子产生有限的位移, 平均的具有了电场方向的偶极矩, 这种极化称为离子位移极化, 如图 2-3 所示。

离子位移极化的特点为:

- 1) 存在于离子结构的电介质中。
- 2) 极化建立所需时间极短, 约  $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ s}$ , 因此极化 ( $\epsilon_r$ ) 不随频率的改变而变化;
- 3)  $\epsilon_r$  具有正的温度系数, 温度升高时, 离子间的距离增大, 一方面使离子间的结合力减弱, 极化程度增加; 另一方面使离子的密度减小, 极化程度降低, 而前者影响大于后者, 所以这种极化随温度的升高而增强。
- 4) 极化也是弹性的, 无能量损失。

(3) 转向极化。在极性电介质中, 分子中的正、负电荷作用中心不重合, 就单个分子而言, 已具有偶极矩, 称为偶极子。没有外电场作用时, 由于偶极子处于不规则的热运动状

态，因此，宏观上对外并不呈现电矩，如图 2-4（a）所示。当有外电场作用时，原先排列杂乱的偶极子将沿电场方向转动，作较有规则的排列，如图 2-4（b）所示。这时整个介质的偶极距不再为零，对外呈现出极性，这种极化称为转向极化。

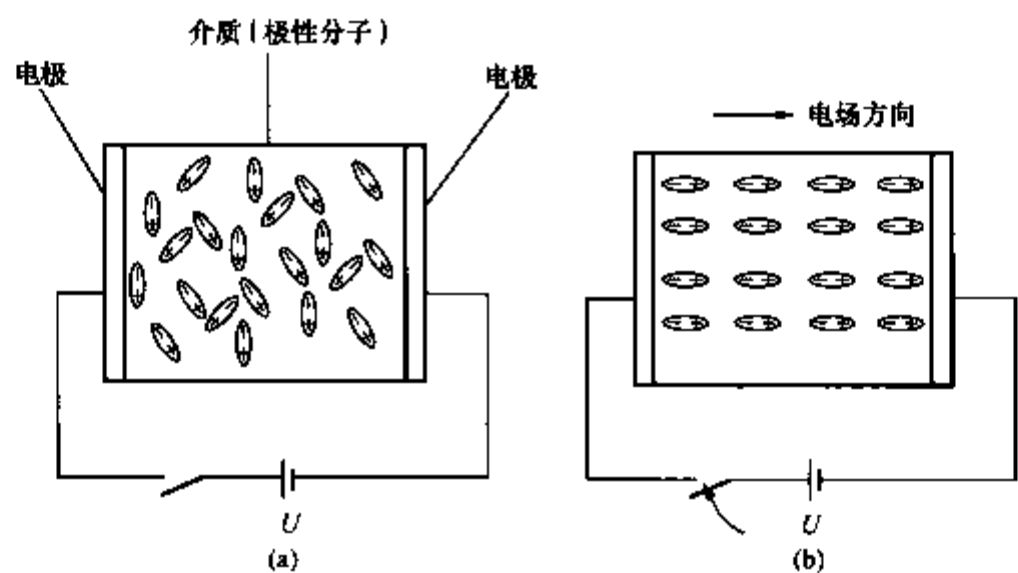


图 2-4 转向极化  
(a) 无外加电场；(b) 有外加电场

转向极化的特点为：

1) 存在于偶极性电介质中。  
2) 极化建立所需时间较长，约为  $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ s}$ ，因此这种极化与频率有较大关系。频率较高时，转向极化跟不上电场的变化，从而使极化减弱，即  $\epsilon_r$  随频率的增加而减小。

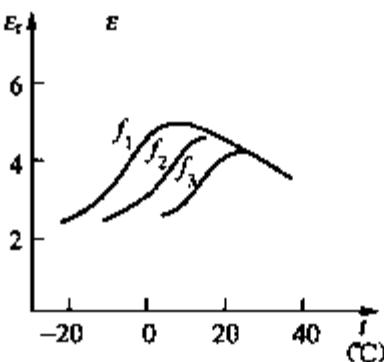


图 2-5 氯化联苯的  $\epsilon_r$  与温度  $t$  的关系  
( $f_1 < f_2 < f_3$ )

3) 温度对转向极化的影响大。温度高时分子热运动加剧，妨碍偶极子沿电场方向转向，极化减弱；温度很低时，分子间联系紧密，偶极子难以转向，不易极化，所以随温度增加，极化程度先增加后降低。以氯化联苯为例，其  $\epsilon_r$ 、 $f$ 、 $t$  之间的关系如图 2-5 所示。

4) 转向极化为非弹性的，偶极子在转向时需要克服分子间的吸引力和摩擦力而消耗能量，因此也称之为“有损极化”。

(4) 夹层极化。上述三种极化都是由带电质点的弹性位移或转向形成的，而夹层极化的机理与上述三种完全不同，它是由带电质点的移动形成的。

在实际电气设备中，常采用多层电介质的绝缘结构，如电缆、电机和变压器的绕组等，在两层介质之间常夹有油层、胶层等形成多层介质结构。即便是采用单一电介质，由于不均匀，也可以看成是由几种不同电介质组成的。现以最简单的双层电介质为例来分析夹层极化。如图 2-6 所示，图 (a) 为双层介质的示意图，图 (b) 为其等值电路。

在开关 S 闭合瞬间，两层介质的初始

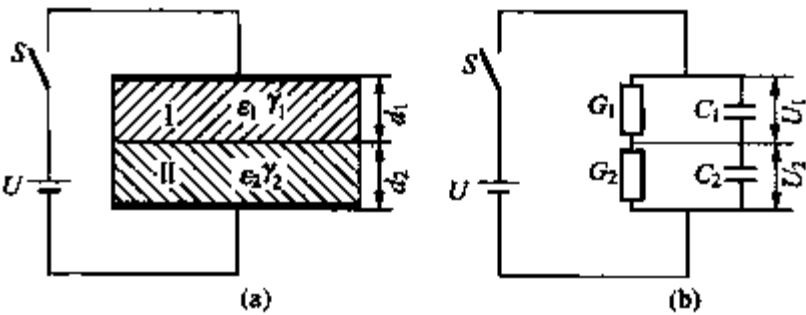


图 2-6 双层介质的极化  
(a) 双层介质示意图；(b) 等值电路

电压按电容成反比分配, 即

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow 0} = \frac{C_2}{C_1} \quad (2-6)$$

到达稳态时, 两层介质上的电压按电导成反比分配, 即

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{G_2}{G_1} \quad (2-7)$$

如果  $\frac{C_2}{C_1} = \frac{G_2}{G_1}$ , 则双层介质的表面电荷不重新分配, 初始电压比等于稳态电压比。但实际中很难满足上述条件, 电荷要重新分配。设  $C_1 > C_2$  而  $G_1 < G_2$ , 则在  $t \rightarrow 0$  时,  $U_1 < U_2$ ; 而在  $t \rightarrow \infty$  时,  $U_1 > U_2$ 。这样, 在  $t > 0$  后, 随着时间  $t$  的增大,  $U_2$  逐渐下降, 而外施电压  $U = U_1 + U_2$  为一定值, 所以  $U_1$  逐渐升高。在这个电压重新分配的过程中, 由于  $U_2$  下降, 所以电容  $C_2$  在初瞬时获得的电荷将有一部分通过电导  $G_2$  泄放掉; 相应地, 电容  $C_1$  则要通过  $G_2$  从电源再吸收一部分电荷, 这部分电荷称为吸收电荷。这种在双层介质分界面上出现的电荷重新分配的过程, 就是夹层极化过程。

这种极化形式存在于不均匀夹层介质中, 由于电荷的重新分配是通过电介质电导  $G$  完成的, 一方面必然带来能量损失, 属于有损极化; 另一方面由于电介质的电导通常都很小, 所以这种极化的建立所需时间很长, 一般为几分钟到几十分钟, 有的甚至长达几小时, 因此, 这种性质的极化只有在低频时才有意义。

#### 4. 极化在工程实际中的应用

(1) 选择绝缘。在选择高压电气设备的绝缘材料时, 除了要考虑材料的绝缘强度外, 还应考虑相对介电常数  $\epsilon_r$ 。例如在制造电容时, 要选择  $\epsilon_r$  大的材料作为极板间的绝缘介质, 以使电容器单位容量的体积和质量减小; 在制造电缆时, 则要选择  $\epsilon_r$  小的绝缘材料作为缆芯与外皮间的绝缘介质, 以减小充电电流。其他绝缘结构也往往希望选用  $\epsilon_r$  小的绝缘材料。

(2) 多层介质的合理配合。一般高压电气设备中的绝缘常常是由几种电介质组合而成的。在交流及冲击电压下, 串联电介质中的电场强度是按与  $\epsilon_r$  成反比分布的, 这样就使得外加电压的大部分常常为  $\epsilon_r$  小的材料所负担, 从而降低了整体的绝缘强度。因此要注意选择  $\epsilon_r$ , 使各层电介质的电场分布较均匀。

(3) 介质损耗与极化类型有关, 而介质损耗是绝缘老化和热击穿的一个重要影响因素。

(4) 在绝缘预防性试验中, 夹层极化现象可用来判断绝缘状况。

### 二、电介质的电导

任何电介质都不可能是理想的绝缘体, 电介质内部总存在一些自由的或联系较弱的带电质点, 在电场作用下, 它们可沿电场方向运动构成电流, 因此任何电介质都具有一定的电导。

#### 1. 电介质电导的定义

在电场作用下, 电介质中的带电质点作定向移动而形成电流的现象, 称为电介质的电导。

#### 2. 电介质电导与金属电导的本质区别

(1) 电介质的电导主要是由离子造成的, 包括介质本身和杂质分子离解出的离子 (主要是杂质离子), 所以电介质电导是离子性电导; 而金属的电导是由金属导体中的自由电子造成的, 所以金属电导是电子性电导。

(2) 电介质的电导很小, 其电阻率一般为  $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 而金属的电导很大, 其电

阻率仅为  $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

(3) 电介质的电导具有正的温度系数, 即随温度的升高而增大。这是因为, 当温度升高时, 介质本身分子和杂质分子的离解度增大, 使参加导电的离子数增多; 另一方面, 随温度的升高, 分子间的相互作用力减弱, 同时离子的热运动加剧, 改变了原来受束缚的状态, 这些都有利于离子的迁移, 所以使电介质的电导增大。而金属的电阻随温度的升高而升高, 故其电导随温度升高而下降, 因此具有负的温度系数。

### 3. 吸收现象

图 2-7 (a) 所示为测量固体电介质中电流的电路。开关 S1 闭合后, 流过电介质内部的电流随时间的变化规律如图 2-7 (b) 所示, 它随时间逐渐衰减, 最终达到某个稳定值, 这种现象称为吸收现象。吸收现象是由电介质的极化产生的, 图中  $i_c$  是由无损极化产生的电流, 由于无损极化建立所需时间很短, 所以  $i_c$  很快衰减到零;  $i_a$  是由有损极化产生的电流, 而有损极化建立所需时间较长, 所以  $i_a$  较为缓慢地衰减到零, 这部分电流又称为吸收电流;  $I_g$  是不随时间变化的恒定分量, 称为电介质的电导电流或泄漏电流。因此通过电介质的电流由三部分组成, 即

$$i = i_c + i_a + I_g \quad (2-8)$$

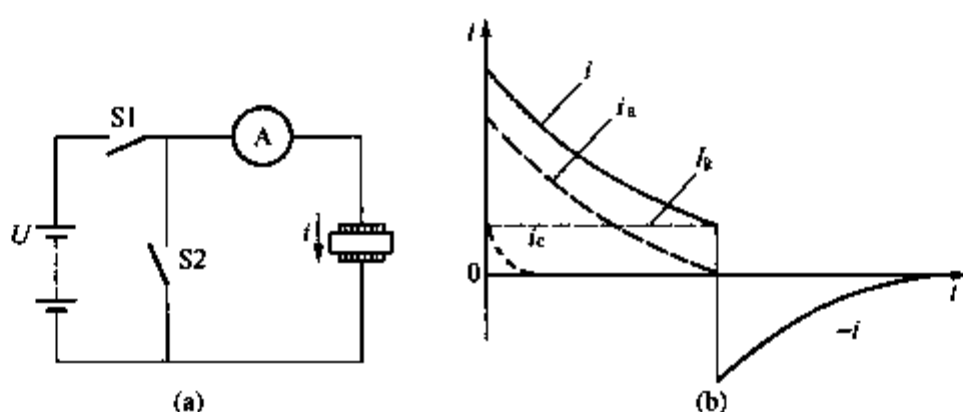


图 2-7 直流电压下流过电介质的电流  
(a) 实验电路; (b) 电流随时间的变化曲线

泄漏电流所对应的电阻  $R = \frac{U}{I_g}$  称为绝缘电阻。电介质中的电流完全衰减至恒定电流  $I_g$  往往需要数分钟以上的时间, 通常测量绝缘电阻时, 应以施加电压 1min 或 10min (如大型电机) 后测得的电流来求出。

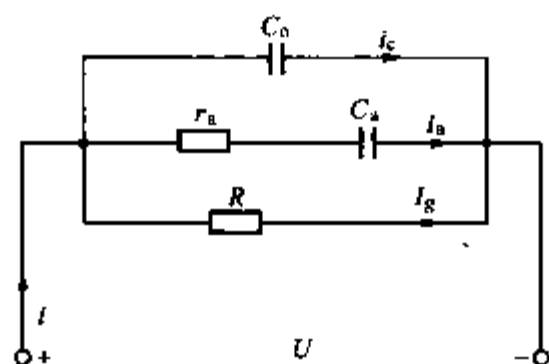


图 2-8 直流电压下介质的等值电路

在图 2-7 (a) 中施加电压达到稳定后断开 S1, 再合上 S2, 则流过电流表的电流如图 2-7 (b) 下部曲线所示, 有与吸收电流变化规律相同的电流反向流过。

根据上述分析, 可以得到电介质的等值电路, 如图 2-8 所示。它由三条并联支路组成, 其中含有电容  $C_0$  的支路代表无损极化引起的瞬时充电电流支路, 电阻  $r_a$  和电容  $C_a$  串联的支路代表有损极化引起的吸收电流支路, 而含有电阻  $R$  的支路代表电导电流支路。

### 4. 电介质的电导

(1) 气体电介质的电导。气体电介质的伏安特性如图 1-3 所示, oa 段可视其电导为常

数，以后就不再是常数了。通常气体绝缘工作在 ab 段，其电导极微小。故气体电介质只要工作在场强低于其击穿场强时，其电导可以忽略不计。

(2) 液体电介质的电导。构成液体电介质电导的主要因素有两种：离子电导和电泳电导。离子电导是由液体本身分子或杂质的分子离解出来的离子造成的；电泳电导是由荷电胶体质点造成的，所谓荷电胶体质点即固体或液体杂质以高度分散状态悬浮于液体中形成了胶体质点，例如变压器油中悬浮的小水滴，它吸附离子后成为荷电胶体质点。

离子电导的大小和分子极性、液体的纯净程度有关。非极性液体电介质本身分子的离解是极微弱的，其电导主要由离解性的杂质和悬浮于液体电介质中的荷电胶体质点所引起。纯净的非极性液体电介质的电阻率  $\rho$  可达  $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ ，弱极性电介质  $\rho$  可达  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 。对于偶极性液体电介质，极性越大，分子的离解度越大， $\rho$  为  $10^{10} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。强极性液体，如水、酒精等实际上已经是离子性导电液了，不能用作绝缘材料。表 2-1 列出了部分液体电介质的电导率和相对介电常数。

表 2-1 液体电介质的电导率  $\gamma$  和相对介电常数  $\epsilon_r$

液体种类	液体名称	温度 (°C)	相对介电常数	电导率 (S/cm)	纯净程度
中 性	变压器油	80	2.2	$0.5 \times 10^{-12}$	未净化的
		80	2.1	$2 \times 10^{-15}$	净化的
		80	2.1	$10^{-15}$	两次净化的
		80	2.1	$0.5 \times 10^{-15}$	高度净化的
极 性	三氯联苯	80	5.5	$10^{-11}$	工程上应用
	蓖麻油	20	4.5	$10^{-12}$	工程上应用
强极性	水	20	8.1	$10^{-7}$	高度净化的
	乙醇	20	25.7	$10^{-8}$	净化的

(3) 固体电介质的电导。固体电介质的电导分为体积电导和表面电导。构成固体电介质电导的主要因素是离子电导。非极性和弱极性固体电介质的电导主要是由杂质离子造成的，纯净介质的电阻率  $\rho$  可达  $10^{17} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$ 。对于偶极性固体电介质，因本身分子能离解，所以其电导是由其本身和杂质离子共同造成的，电阻率较小，最高的可达  $10^{15} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

对于离子性电介质，电导的大小和离子本身的性质有关。单价小离子 ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )，束缚弱，易形成电流，因而含单价小离子的固体电介质的电导较大。结构紧密，洁净的离子性电介质，电阻率  $\rho$  为  $10^{17} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$ ；结构不紧密且含单价小离子的离子性电介质的电阻率仅为  $10^{13} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

固体电介质的表面电导主要由表面吸附的水分和污物引起，介质表面干燥、清洁时电导很小。介质吸附水分的能力与自身结构有关。石蜡、聚苯乙烯、硅有机物等非极性和弱极性电介质，其分子和水分子的亲和力小于水分子的内聚力，表现为水滴的接触角大于  $90^\circ$ ，如图 2-9 (a) 所示，水分不易在其表面形成水膜，表面电阻率很小，这种固体电介质称为憎

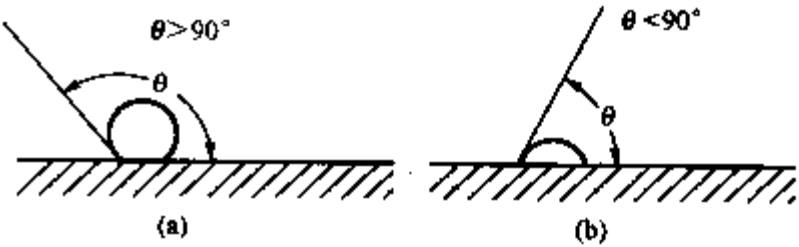


图 2-9 水滴在固体表面的接触角示意图  
(a) 憎水性；(b) 亲水性

水性介质；玻璃、陶瓷等极性电介质和偶极性电介质，其分子和水分子的亲和力大于水分子的内聚力，表现为水滴的接触角小于  $90^\circ$ ，如图 2-9 (b) 所示，水分在其表面容易形成水膜，表面电导率很大，这种固体电介质称为亲水性介质。

由上述分析可知，固体电介质中的泄漏电流，除了通过介质本身体积的泄漏电流  $I_v$  外，还包括沿介质表面的泄漏电流  $I_s$ ，即  $I = I_v + I_s$ ，因而介质的绝缘电阻  $R$  实际上是体积电阻  $R_v$  和表面电阻  $R_s$  两者的并联值，即

$$R = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s} \quad (2-9)$$

为了消除或减小介质表面状况对所测绝缘电阻的影响，在测试之前通常先对介质表面进行清洁处理，并在测量接线上采取一定的措施，以减小表面泄漏电流对测量的影响。

### 5. 影响电介质电导的主要因素

(1) 温度。离子电导随温度的升高而增加 [参见本节 2. (3)]。电介质电导率与温度的关系如下式所示

$$\gamma = Ae^{-\frac{B}{T}} \quad (2-10)$$

式中， $A$ 、 $B$  为常数， $T$  为绝对温度。

(2) 杂质。由于杂质中的离子数较多，因此当介质中的杂质增多时，其电导会明显增加。各类杂质中水分的影响最大，因水分本身电导较大，而且水分能使介质中的另一些杂质（如盐类、酸类等物质）发生水解，从而大大增加介质的电导。所以，电气设备在运行中一定要注意防潮。

### 6. 电导在工程实际中的应用

(1) 串联的多层电介质，在直流电压作用下，各层电压分布与电导成反比。因此设计用于直流的电气设备时，要注意所用电介质的电导率，尽量使材料得到合理的使用。

(2) 注意环境湿度对固体电介质表面电导的影响，注意亲水性材料的表面防水处理。

(3) 在绝缘预防性试验中，通过测量介质的绝缘电阻和泄漏电流来判断绝缘是否存在受潮或其他劣化现象。

## 三、电介质的损耗

由前述电介质的极化和电导可以看出，电介质在电场中是有能量损耗的。

### 1. 介质损耗的定义

在外加电压作用下，电介质在单位时间内消耗的能量称为介质损耗，简称介损。

### 2. 介质损耗的基本形式

(1) 电导损耗。电导损耗是由电介质中的泄漏电流引起的。气体、液体和固体电介质中都存在这种形式的损耗。通常，电介质的电导损耗很小，但当电介质受潮、脏污或温度升高时，电导损耗会急剧增大。

由于电介质中的泄漏电流与电源频率无关，所以，电导损耗在交、直流电压下都存在。

(2) 极化损耗。极化损耗是由有损极化（即转向极化和夹层极化）引起的。在偶极性电介质及复合电介质中存在这种形式的损耗。

在直流电压下，由于极化的建立仅在加压瞬间出现一次，与电导损耗相比可以忽略不计。而在交流电压下，随着电压极性的改变，不断有极化建立，极化损耗的大小与电源的频率有很大关系。在频率不太高时，随频率升高极化损耗增大；当频率超过某一数值后，随频

率升高,极化过程反而减弱,损耗减小。

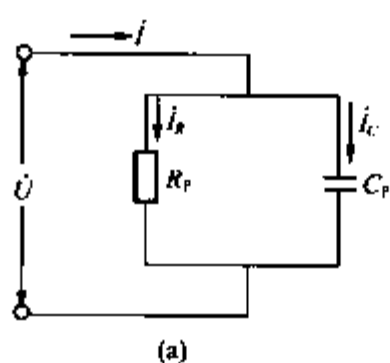
(3) 游离损耗。游离损耗是由气体电介质在电场的作用下出现局部放电引起的。气体电介质及含有气泡的液体、固体电介质中都存在这种形式的损耗。游离损耗仅在外加电压超过一定值时才出现,且随电压升高而急剧增大。这在交、直流电压下都存在。

### 3. 介质损耗的指标

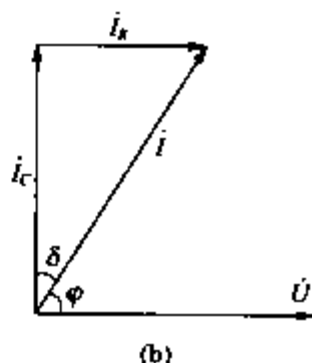
在直流电压(低于发生局部放电的电压)作用下,介质中仅有电导损耗,因此可用体积电导率和表面电导率这两个物理量来表征。

在交流电压作用下,除电导损耗外,还有极化损耗,仅用电导率来表征介质损耗就不全面了,需要引入一个新的物理量——介质损耗角正切值  $\tan\delta$  来表示此时介质中的能量损耗。

图 2-8 所示的三支路等值电路可以代表任何实际电介质,不但适用于直流电压,也适用于交流电压。电路中的电阻  $R$  和  $r_s$  是引起功率损耗的元件, $R$  代表电导引起的损耗, $r_s$  代表极化损耗。此等值电路可进一步简化为图 2-10 和图 2-11 所示的电阻电容并联或串联的等值电路。



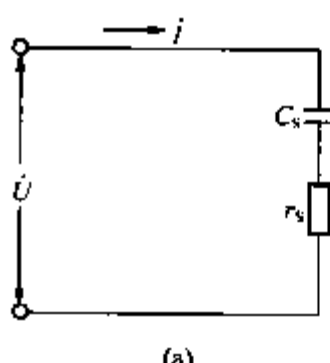
(a)



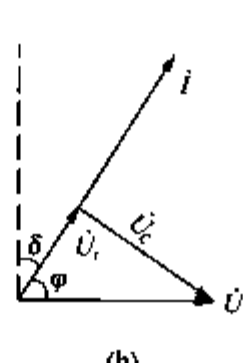
(b)

图 2-10 电介质的并联等值电路及相量图

(a) 等值电路; (b) 相量图



(a)



(b)

图 2-11 电介质的串联等值电路及相量图

(a) 等值电路; (b) 相量图

在等值电路所对应的相量图中, $\varphi$  为电压电流相量之间的夹角,即电路的功率因数角, $\delta$  为  $\varphi$  的余角,称为介质损耗角。

并联等值电路中,  $I_R = \frac{\dot{U}}{R_p}$ ,  $I_C = \frac{\dot{U}}{-jX_C} = j\omega C_p \dot{U}$ , 因此

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R_p}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2-11)$$

$$P = UI_R = UI_C \tan\delta = U^2 \omega C_p \tan\delta \quad (2-12)$$

在串联等值电路中,  $\dot{U}_r = r_s \dot{I}$ ,  $\dot{U}_C = -jX_C \dot{I} = \frac{\dot{I}}{j\omega C_s}$

$$\tan\delta = \frac{U_r}{U_C} = \frac{r_s \dot{I}}{\dot{I}/\omega C_s} = \omega C_s r_s \quad (2-13)$$

$$P = I^2 r_s = \left(\frac{U}{Z}\right)^2 r_s = \frac{U^2}{r_s^2 + (1/\omega C_s)^2} r_s = \frac{U^2 \omega^2 C_s^2 r_s}{1 + (\omega C_s r_s)^2} = \frac{U^2 \omega C_s \tan\delta}{1 + \tan^2\delta} \quad (2-14)$$

以上是对同一电介质的两种不同形式的等值电路进行的分析,所以其功率损耗应相等,比较式 (2-12) 和式 (2-14) 可知

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2\delta} \quad (2-15)$$

式 (2-15) 表明,同一电介质用不同等值电路表示时,其等值电容是不相同的。通常

$\tan\delta$  远小于 1, 所以  $1 + \tan^2\delta \approx 1$ , 故  $C_p \approx C_s$ 。这时介质损耗在两种等值电路中可用同一公式表示, 即

$$P = U^2 \omega C \tan\delta \quad (2-16)$$

显然, 介质损耗  $P$  与外加电压  $U$ , 电源角频率  $\omega$  及电介质的等值电容  $C$  等因素有关, 因此直接用  $P$  作为比较各种电介质品质好坏的指标是不合适的。在上述各量均为给定值的情况下,  $P$  最后决定于  $\tan\delta$ , 而  $\tan\delta = \frac{I_R}{I_C}$  是一个无量纲的量, 它与电介质的几何尺寸无关, 只反映介质本身的性能。因此, 在高电压工程中常把  $\tan\delta$  作为衡量电介质损耗的指标, 称之为介质损耗因数或介质损耗角正切。

#### 4. 电介质的损耗及其影响因素

影响电介质损耗的因素主要有温度、频率和电压。不同的电介质所具有的损耗形式不同, 从而温度、频率和电压对电介质损耗的影响也不同。

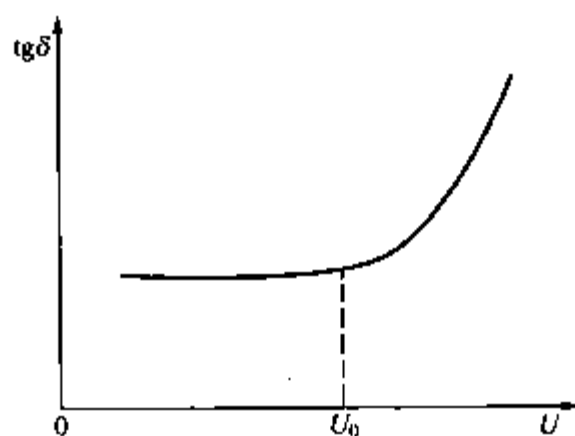


图 2-12 气体的  $\tan\delta$  与电压的关系

(1) 气体电介质的损耗。气体电介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  接近 1, 极化率极小, 因此气体电介质损耗仅由电导引起。当外加电压低于气体的起始放电电压时, 气体电介质的电导也是极小的, 所以气体电介质的损耗很小, 受温度和频率的影响都不大。因此, 实际工程中, 常用气体作为标准电容器的介质。

当外加电压超过气体的起始放电电压时, 气体将发生局部放电, 损耗急剧增加, 如图 2-12 所示。

(2) 液体和固体电介质的损耗。非极性或非极性的液体、固体及结构较紧密的离子性电介质, 它们的极化形式主要是电子位移极化和离子位移极化, 没有能量损耗, 因此这类电介质的损耗主要由电导引起,  $\tan\delta$  较小。频率对其损耗没有影响, 温度对这类介质的损耗影响与温度对电导的影响相似, 即  $\tan\delta$  随温度的升高也是按指数规律增大。

偶极性液体、固体及结构不紧密的离子性电介质, 除具有电导损耗外, 还有极化损耗, 因此  $\tan\delta$  较大, 而且和温度、频率等因素有较复杂的关系, 如图 2-13 所示。图中曲线有最大值和最小值, 首先分析电源频率为  $f_1$  时的情况, 在温度较低 ( $t < t_1$ ) 时, 电导损耗和极化损耗都很小, 随温度的升高偶极子转向容易, 从而使极化损耗显著增加, 同时电导损耗也随温度升高而略有增加, 因此在这一范围内  $\tan\delta$  随温度的升高而增大。当  $t = t_1$  时, 总的介质损耗达到最大值。当温度继续升高 ( $t_1 < t < t_2$ ) 时, 分子热运动加剧, 阻碍了偶极子在电场作用下做规则排列, 极化损耗减小, 在此阶段虽然电导损耗随温度的升高仍是增加的, 但其增加的程度比极化损耗减小的程度小, 因此在这一范围内  $\tan\delta$  是随温度升高而减小的, 当  $t = t_2$  时, 总损耗达到最小值。当温度进一步升高 ( $t > t_2$ ) 时, 电导损耗随温度的升高而急剧增加, 此时总损耗以电导损耗为主, 也随之急剧增大。

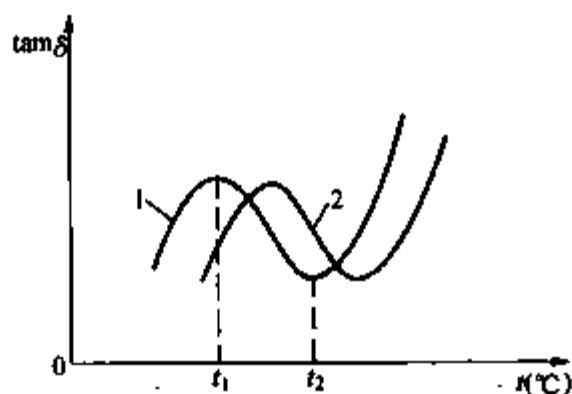


图 2-13 极性介质  $\tan\delta$  与温度和频率的关系

1—对应于频率  $f_1$  的曲线;  
2—对应于频率  $f_2$  的曲线 ( $f_1 < f_2$ )

当电源频率增高时,由图可见,整个曲线右移,这是因为在较高的频率下,偶极子来不及充分转向,要使转向极化充分进行,就必须减小粘滞性即升高温度。

在一定的电压范围内, $\tan\delta$ 与外加电压无关。若电介质中含有气泡,当电压升高到气泡的起始游离电压以上时,气泡发生游离,介质中产生了游离损耗, $\tan\delta$ 随电压的升高而急剧增大。

#### 5. $\tan\delta$ 在工程实际中的应用

(1) 选择绝缘。设计绝缘结构时,必须注意绝缘材料的 $\tan\delta$ , $\tan\delta$ 过大会引起严重发热,容易使材料劣化,甚至导致热击穿。

(2) 在绝缘预防性试验中判断绝缘状况。当绝缘受潮或劣化时, $\tan\delta$ 将急剧上升,绝缘内部是否存在局部放电,也可以通过 $\tan\delta$ 与 $U$ 的关系曲线加以判断。

(3) 介质损耗引起的发热有时也可以利用。例如电瓷生产中对泥坯加热即是在泥坯两端加上交流电压,利用介质损耗发热加速泥坯的干燥过程。由于这种方法是利用材料本身介质损耗的发热,所以加热非常均匀。

## 第二节 液体电介质的击穿

工程上常用的液体电介质有矿物油、植物油(蓖麻油)及人工合成油(如硅油、十二烷基苯等)等几类。目前应用最广泛的是从石油中提炼出的矿物油。通过不同程度的提炼可得到应用于不同高压设备中的液体电介质,如变压器油、电缆油和电容器油等。液体电介质的耐电强度一般比气体高,除具有绝缘的作用外,还有冷却、灭弧的作用。

目前对液体电介质击穿机理的研究远不及对气体电介质击穿机理的研究,还提不出一个较为完善的击穿理论。其主要原因在于:纯净的液体电介质和工程用的液体电介质的击穿机理有很大不同,工程用液体电介质中总含有某些气体、液体或固体杂质,这些杂质的存在对液体电介质的击穿过程影响很大,需分别讨论。

### 一、液体电介质的击穿机理

#### 1. 纯净液体电介质的击穿机理

一般认为,纯净的液体电介质的击穿机理与气体电介质的击穿机理相似,都是由电的作用造成的,属于电击穿的性质。液体电介质中因强场发射等原因产生的初始电子在电场作用下向阳极作加速运动,与液体分子发生碰撞产生碰撞游离,形成电子崩导致液体电介质的击穿。

由于液体电介质的密度远比气体电介质的密度大,所以电子在其中的自由行程很短,不容易积累起产生碰撞游离所需的动能。因此纯净液体电介质的耐电强度比常态下气体电介质的耐电强度高得多。

#### 2. 工程用液体电介质的击穿机理

工程用液体电介质中总含有一些杂质,主要是气体、水分和纤维。这些杂质是在液体电介质的生产、运行中混入的。工程上要得到高度纯净的液体电介质是非常困难的,因为其提纯工艺很复杂。在电气设备的制造和运行中,不可避免地会掺入杂质,如注入液体电介质的过程中会混入空气,液体电介质与大气接触时会发生氧化,并吸入气体和水分;运行中液体本身也会老化,分解出气体、水分和聚合物;固体绝缘材料(纸或布)上也会有纤维脱落到

液体电介质中。杂质的存在使工程用液体电介质的击穿具有了新的特点，一般用“小桥”理论来说明工程用液体电介质的击穿过程。

“小桥”理论认为，由于液体电介质中的水和纤维的相对介电常数（分别为 81，6~7）比油的相对介电常数（1.8~2.8）大得多，这些杂质很容易极化并沿电场方向定向排列成杂质的“小桥”。当杂质“小桥”贯穿两极时，在电场作用下，由于组成此小桥的水分和纤维的电导较大，使泄漏电流增加，从而使“小桥”急剧发热，油和水分局部沸腾汽化，形成“气体桥”。气体中的电场强度要比油中高很多（与相对介电常数成反比），而气体的耐电强度比油的低很多，最后沿此“气体桥”击穿。这种形式的击穿包含热过程，所以属于热击穿的范畴。

## 二、影响液体电介质击穿电压的因素

液体电介质击穿电压的大小既决定于其自身品质的优劣，也与外界因素，如温度、电压等有关。

### 1. 液体电介质本身品质的影响

液体电介质的品质决定于其所含杂质的多少。含杂质越多，品质越差，击穿电压越低。

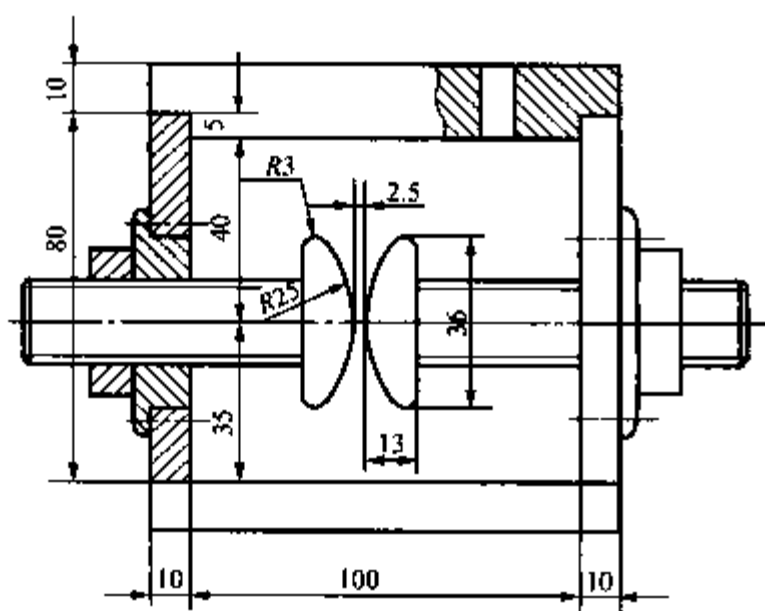


图 2-14 标准油杯示意图

对液体电介质，通常用标准试油器（又称标准油杯）按标准试验方法测得的工频击穿电压来衡量其品质的优劣，而不用击穿场强值。因为即使是均匀场，击穿场强也随间隙距离的增大而明显下降。

我国国家标准 GB/T507—2002 对标准油杯推荐了两种电极：一种为球形电极；另一种为球盖形电极，电极材料为黄铜或不锈钢。球形电极由两个直径为 12.5~13.0mm 的球电极组成，电极间距离为 2.5mm；球盖形电极由两个直径为 36mm 的球盖形电极组成，电极间距离也为 2.5mm，见图 2-14。标准油杯的器壁为透明的有机玻璃。

必须指出，在标准试油器中测得的油的耐电强度只能作为对油的品质的衡量标准，不能用此数据直接计算在不同条件下油间隙的耐受电压，因为同一种油在不同条件下的耐电强度是有很大差别的。

下面具体讨论变压器油本身的某些品质因素对耐电强度的影响。

(1) 含水量。水分在油中有三种存在方式，当含水量极微小时，水分以分子状态溶解于油中，这种状态的水分对油的耐电强度影响不大；当含水量超过其溶解度时，多余的水分便以乳化状态悬浮在油中，这种悬浮状态的小水滴在电场作用下极化易形成小桥，对油的耐电强度有很强烈的影响。图 2-15 所示是在标准油杯中测出的变压器油的工频击穿电压与含水量的关系。由图可见，在常温下，只要油中含有

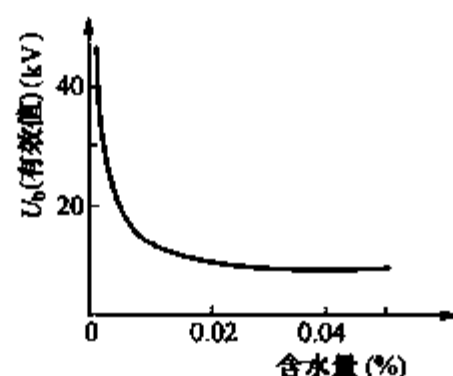


图 2-15 在标准油杯中变压器油的工频击穿电压和含水量的关系

0.01%的水分，就会使油的击穿电压显著下降。当含水量超过 0.02% 时，多余的水分沉淀到油的底部，因此击穿电压不再降低。

(2) 含纤维量。当油中有纤维存在时，在电场力的作用下，纤维将沿着电场方向极化排列形成杂质小桥，使油的击穿电压大大下降。纤维又具有很强的吸附水分的能力，吸湿的纤维对击穿电压的影响更大。

(3) 含气量。绝缘油能够吸收和溶解相当数量的气体，其饱和溶解量主要由气体的化学成分、气压、油温等因素决定。温度对油中气体饱和溶解量的影响随气体种类而异，没有同一的规律。气压升高时，各种气体在油中的饱和溶解量都会增加，所以油的脱气处理通常都在高真空下进行。

溶解于油中的气体在短时间内对油的性能影响不大，主要只是使油的黏度和耐电强度稍有降低。它的主要危害有二：一是当温度、压力等外界条件发生改变时，溶解在油中的气体可能析出，成为自由状态的小气泡，容易导致局部放电，加速油的老化，也会使油的耐电强度有较大的降低；二是溶解在油中的氧气经过一定时间会使油逐渐氧化，酸价增大，并加速油的老化。

(4) 含碳量。某些电气设备中的绝缘油在运行中常受到电弧的作用。电弧的高温会使绝缘油分解出气体（主要为氢气和烃类气体）、液体（主要为低分子烃类）及固体（主要为碳粒）物质。碳粒对油的耐电强度有两方面的作用：一方面，碳粒本身为导体，它散布在油中，使碳粒附近局部电场增强，从而使油的耐电强度降低；另一方面，新生的活性碳粒有很强的吸附水分和气体的能力，从而使油的耐电强度提高。总的来说，细而分散的碳粒对油的耐电强度的影响并不显著，但碳粒（再加吸附了某些水分和杂质）逐渐沉淀到电气设备的固体介质表面，形成油泥，则易造成油中沿固体介质表面的放电，同时也影响散热。

## 2. 温度的影响

温度对变压器油耐电强度的影响和油的品质、电场均匀度及电压作用时间有关。在较均匀电场及 1min 工频电压作用下，变压器油的击穿电压与温度的关系如图 2-16 所示。曲线 1、2 分别代表干燥的油和受潮的油的试验曲线。受潮的油，当温度从 0℃ 逐渐升高时，水分在油中的溶解度逐渐增大，一部分乳化悬浮状态的水分就转化为溶解状态，使油的耐电强度逐渐增大；当温度超过 60~80℃ 时，部分水分开始汽化，使油的耐电强度降低；当油温稍低于 0℃ 时，呈乳化悬浮状态的水分最多，此时油的耐电强度最低；温度再低时水分结成冰粒，冰的介电常数与油相近，对电场畸变的程度减弱，因而油的耐电强度又逐渐增加。对于很干燥的油，就没有这种变化规律，油的耐电强度只是随着温度的升高单调地降低。

在极不均匀电场中，油中的水分和杂质不易形成小桥，受潮的油的击穿电压和温度的关系不像均匀电场中那样复杂，只是随着温度的上升，击穿电压略有下降。

不论是均匀电场还是不均匀电场，在冲击电压作用下，即使是品质较差的油，油隙的击穿电压和温度也没有显著关系，只是随着温度的上升，油隙的击穿电压稍有所下降。

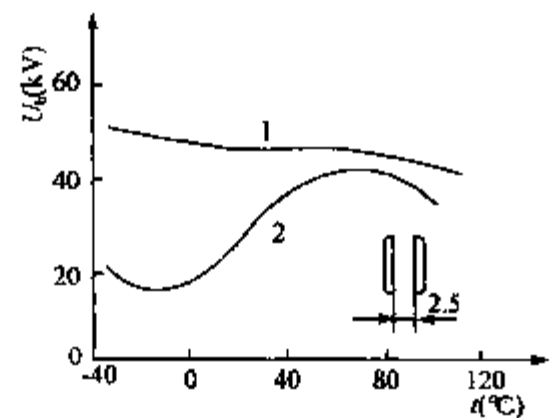


图 2-16 在标准油杯中变压器油工频击穿电压有效值与温度的关系  
1—干燥的油；2—受潮的油

降。主要是冲击电压作用时间太短, 杂质来不及形成小桥的缘故。

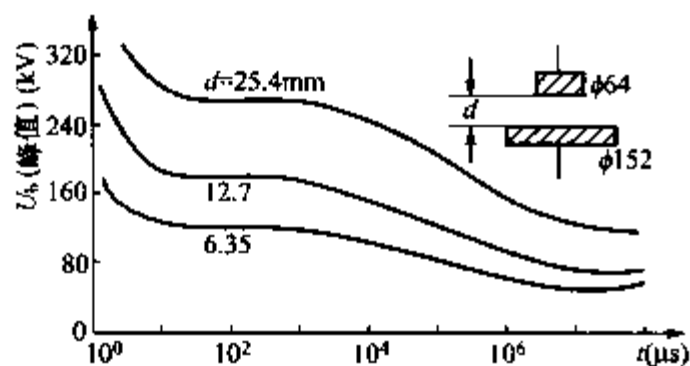


图 2-17 变压器油的击穿电压和电压作用时间的关系

### 3. 电压作用时间的影响

电压作用时间对油的耐电强度有很大影响, 如图 2-17 所示。

在电压作用时间很短时 (小于毫秒级), 击穿电压随时间的变化规律和气体电介质的伏秒特性相似, 具有纯电击穿的性质; 电压作用时间越长, 杂质成桥, 介质发热越充分, 击穿电压越低, 属于热击穿。对一般不太脏的油做 1min 击穿电压和长时间击穿电压的试验结果差

不多, 故做油耐压试验时, 只做 1min。

### 4. 电场情况的影响

由图 2-18 可见, 在工频电压作用下, 如电场比较均匀 (曲线 2), 则油的品质对油隙击穿电压的影响很大; 如电场极不均匀 (曲线 1), 则油的品质对油隙击穿电压的影响很小。这是因为在极不均匀电场下, 电极附近的电场很强, 造成强烈的游离, 电场力对带电质点强烈的吸斥作用使该处的油受到剧烈的扰动, 以致杂质和水分等很难形成“小桥”的缘故。

在冲击电压作用下, 由于杂质本身的惯性, 不可能在极短的电压作用时间内沿电场方向排列成“小桥”, 故不论电场均匀与否, 油的品质对冲击击穿电压均无显著影响, 如图 2-19 所示。

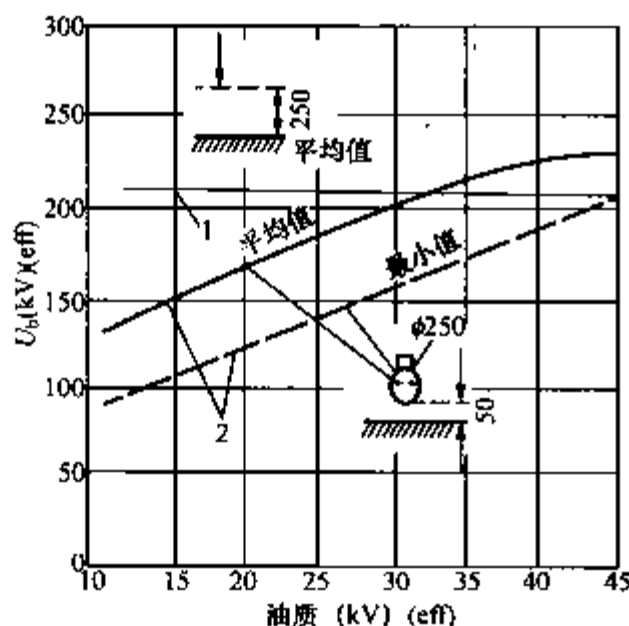


图 2-18 不同电场情况下变压器油的工频击穿电压与油品质的关系

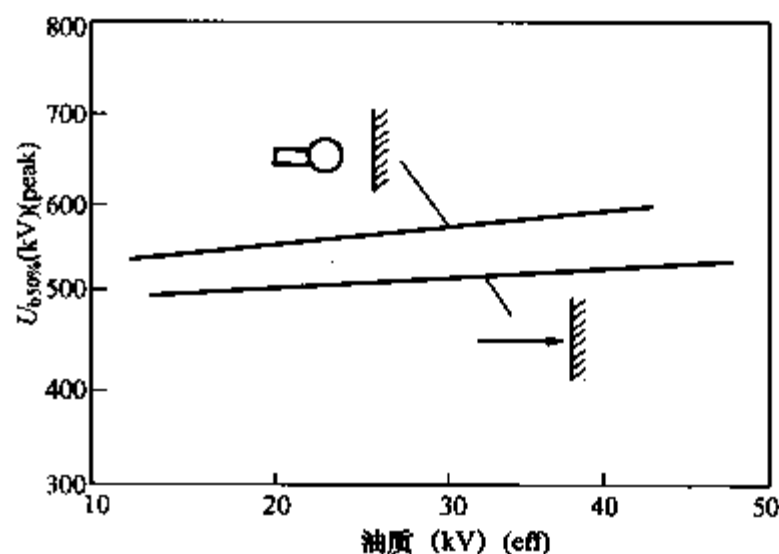


图 2-19 冲击电压作用下油质对油隙击穿电压的影响

### 5. 压力的影响

不论电场均匀与否, 当压力增加时, 工程用变压器油的工频击穿电压会随之升高, 这个关系在均匀电场中更为显著。其原因是随着压力的增加, 气体在油中的溶解度增加, 气泡的局部放电起始电压也提高, 这两个因素都将使油的击穿电压提高。若除净油中所含气体或在冲击电压作用下, 则压力对油隙的击穿电压几乎没有什么影响。这说明油隙的击穿电压随压力的增加而升高的原因在于油中含有气体。总的来说, 即使是较均匀电场, 油隙的击穿电压随压力的增大而升高的程度远不如气隙。

### 三、提高液体电介质击穿电压的方法

#### 1. 提高并保持油品质

提高并保持油品质最常用的方法如下。

(1) 过滤。将油在压力下连续通过滤油机中的大量滤纸层，油中的杂质（包括纤维、碳粒、树脂、油泥等）被滤纸阻挡，油中大部分的水分和有机酸等也被滤纸纤维吸附，从而大大提高了油的品质。若在油中加一些白土、硅胶等吸附剂，吸附油中的水分、有机酸等，然后再过滤，效果会更好。

(2) 防潮。油浸式绝缘在浸油前必须烘干，必要时可用真空干燥法去除水分；在油箱呼吸器的空气入口放干燥剂，以防潮气进入。

(3) 祛气。常用的方法是先将油加热，在真空中喷成雾状，油中所含水分和气体即挥发并被抽走，然后在真空条件下将油注入电气设备中。

#### 2. 采用“油—屏障”式绝缘

(1) 覆盖层。覆盖层是指紧贴在金属电极上的固体绝缘薄层，通常用漆膜、黄蜡布、漆布带等做成。由于它很薄（ $<1\text{mm}$ ），所以它并不会显著改变油中电场分布。它的作用主要是使油中的杂质、水分等形成的“小桥”不能直接与电极接触，从而减小了流经杂质小桥的电流，阻碍了杂质“小桥”中热击穿过程的发展。覆盖层的作用显然是与杂质“小桥”密切相关的，在杂质“小桥”的作用比较显著的场合，覆盖层的效果就会较强，反之就会较弱。

实验结果表明，油本身品质越差、电场越均匀、电压作用时间越长，则覆盖层对提高油隙击穿电压的效果就越显著，且能使击穿电压的分散性大为减小。对一般工程用的油，在工频电压作用下，覆盖层的效果大致为：在均匀电场、稍不均匀电场和极不均匀电场中，覆盖层可使油隙的工频击穿电压分别提高约  $100\%\sim 70\%$ 、 $70\%\sim 50\%$ 、 $50\%\sim 20\%$ 。实验结果还表明，覆盖层上如有个别穿孔或击穿（但无明显烧焦者）等情况对油隙击穿电压没有很大影响，这可能是杂质“小桥”和电极接触点的位置具有概率统计性质的缘故。在冲击电压作用下，覆盖层几乎不起什么作用。

(2) 绝缘层。绝缘层在形式上就像加厚了的覆盖层（有的厚度可达几十毫米），绝缘层不仅能起覆盖层的作用，减小杂质的有害影响，而且它能承担一定的电压，可改善电场的分布。它通常只用在不均匀电场中，包在曲率半径较小的电极上，由于固体绝缘层的介电常数比油大，因此能降低绝缘层所填充的部分空间的场强；固体绝缘层的耐电强度也较高，不会在其中造成局部放电。固体绝缘层的厚度应使其外缘处的曲率半径已足够大，致使此处油中的场强已减小到不会发生电晕或局部放电的程度。变压器高压引线、屏蔽环以及充油套管的导电杆上都包有绝缘层。

(3) 屏障。屏障又称极间障或隔板，是放在电极间油间隙中的固体绝缘板（层压纸板或层压布板），其形状可以是平板、圆筒、圆管等，厚度通常为  $2\sim 7\text{mm}$ ，主要由所需机械强度来决定。屏障的作用一方面是阻隔杂质“小桥”的形成；另一方面和气体电介质中放置屏障的作用类似，在极不均匀电场中，曲率半径小的电极附近场强高，会先发生游离，游离出的带电粒子被屏障阻挡，并分布在屏障的一侧，使另一侧油隙中的电场变得比较均匀，从而提高油间隙的击穿电压。

在极不均匀电场（如棒—板）中，在工频电压作用下，当屏障与棒极距离  $S'$  为总间隙距离  $S$  的  $15\%\sim 25\%$  时，屏障的作用最大，此时，油隙的击穿电压可达无屏障时的  $200\%\sim$

250%。当屏障过分靠近棒极时,有可能引起棒极与屏障之间的局部击穿,使屏障逐渐被破坏。

在较均匀电场中,屏障的最优位置仍在  $S'/S \approx 0.25$  处,但此时油隙的平均击穿电压只能提高 25%,不过它能使击穿电压的分散性减小。

为了使屏障能充分发挥作用,屏障的面积应足够大,以避免绕过其边缘的放电,最好是将屏障的形状做成与电极的形状接近相似并包围电极。屏障的厚度超过机械强度所要求的厚度是不必要的,而且是没有好处的。特别在较均匀电场中,由于屏障材料的介电常数比油大得多,过厚的屏障,反而会增大油隙中的场强。

在较大的油间隙中若合理地布置几个屏障,可使击穿电压进一步提高。

在冲击电压作用下,油中杂质来不及形成“小桥”,所以屏障的作用就很小了。

### 第三节 固体电介质的击穿

固体电介质的击穿特性与气体、液体电介质的击穿特性有很大不同,主要体现在以下两点:一是固体电介质的固有耐电强度比气体和液体电介质高。通常,空气的耐电强度一般在  $3 \sim 4 \text{ kV/mm}$  左右;液体的耐电强度在  $10 \sim 20 \text{ kV/mm}$ ;而固体的耐电强度在十几~几百  $\text{kV/mm}$ ;二是固体电介质的击穿过程最复杂,且击穿后其绝缘性能不能恢复。固体电介质击穿后会出现烧焦或熔化的通道、裂缝等,即使去掉外施电压,也不能像气体、液体电介质那样恢复绝缘性能,属于非自恢复绝缘。

#### 一、固体电介质的击穿理论

固体电介质的击穿与电压作用时间有很大的关系,如图 2-20 所示,并且随电压作用时间的不同,固体电介质的击穿有:电击穿、热击穿和电化学击穿三种不同的形式。

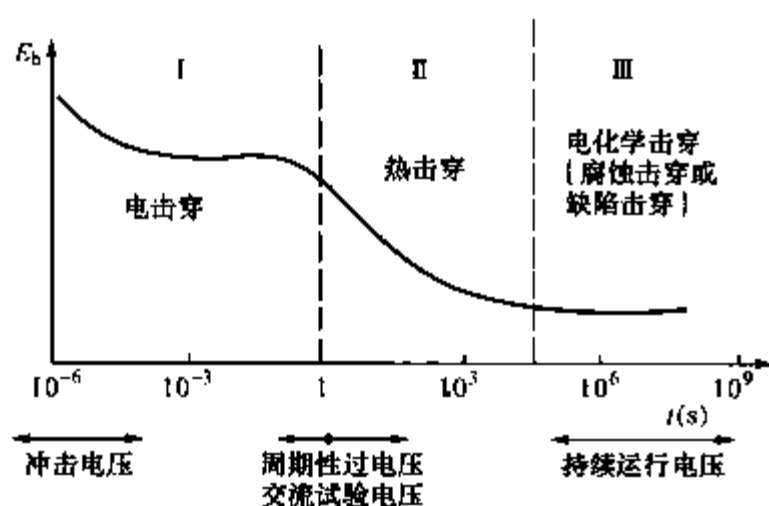


图 2-20 固体电介质的击穿场强与电压作用时间的关系

#### 1. 电击穿

固体电介质的电击穿理论与气体的击穿相似,认为是在强电场作用下,电介质内部少量的带电质点剧烈运动,发生碰撞游离形成电子崩,当电子崩足够强时,破坏了固体电介质的晶格结构,导致击穿。

电击穿的主要特点是:电压作用时间短;击穿电压高;击穿电压与环境温度无关;而电场均匀程度对击穿电压影响很大。当介质的电导很小,又有良好的散热条件以及电介质内部不存在局部放电时,固体电介质所发生的击穿一般为电击穿。

#### 2. 热击穿

热击穿是由于固体电介质内部的热不稳定过程造成的。固体电介质长期在电压作用下,由于电导和极化损耗的存在,使介质发热升温,而电介质电导具有正的温度系数,温度升高电导变大,损耗发热也随之增大。在电介质不断发热升温的同时,也存在一个通过电极及其他介质向外不断散热的过程。如果同一时间内发热量等于散热量,即达到热平衡,则介质温

度不再上升而是稳定于某一数值，这时将不致引起介质绝缘强度的破坏。如果散热条件不好或电压达到某一临界值，使发热量超过散热量，则介质的温度会不断上升，以致引起电介质分解、炭化或烧焦，最终击穿。

热击穿的主要特点是：发生热击穿时，介质温度尤其是热击穿通道处的温度特别高；热击穿电压随环境温度的升高呈指数规律下降；随外施电压作用时间的增长而下降；随外施电压频率的增高而下降；周围媒质的散热条件越差，热击穿电压越低；固体电介质的厚度增加或其  $\tan\delta$  增大，都会使介质发热量增大，导致热击穿电压下降。

### 3. 电化学击穿

电介质在运行中长期受到电、热、化学和机械力等的作用，使其物理、化学性能发生不可逆的劣化，最终导致击穿，这种过程称为电化学击穿。电化学击穿是一个复杂的缓慢过程，是电介质内部和边缘处存在的气泡、气隙，长期在工作电压作用下发生电晕或局部放电，产生臭氧、二氧化氮等气体氧化、腐蚀绝缘；产生热量，增大局部电导和介质损耗，甚至造成局部烧焦绝缘以及气体游离产生带电质点撞击、破坏绝缘等综合作用的结果。所有这些情况都将导致绝缘劣化、击穿强度下降，以致在长时期电压作用下发生热击穿，或者在短时过电压作用下发生电击穿。

电化学击穿是固体电介质在电压长期作用下劣化、老化而引起的，它与固体电介质本身的制造工艺、工作条件等有密切关系，并且电化学击穿的击穿电压比电击穿和热击穿更低，甚至在工作电压下就可能发生。所以对固体电介质的电化学击穿应引起足够的重视。

## 二、影响固体电介质的击穿电压的因素

### 1. 电压作用时间

电压作用时间越长，击穿电压越低，而且对于大多数固体电介质来说存在着明显的分界点。当电压作用时间足够长，以致引起热击穿或电化学击穿时，击穿电压急剧下降。以常用的油浸电工纸板为例，如图 2-21 所示，以 1min 工频击穿电压（幅值）作为基准值（100%），则在长期工作电压下的击穿电压值仅为其几分之一，而在雷电冲击电压作用下的击穿电压值为其 300% 以上。电击穿与热击穿的分界点时间约在  $10^5 \sim 10^6 \mu\text{s}$  之间，小于此值的击穿属于电击穿，因为在这段时间内，热与化学的影响都来不及起作用。在此区域内，在较宽的时间范围内击穿电压与电压作用时间几乎无关，只有在时间小于微秒级时击穿电压才升高，这与气体放电的伏秒特性很相似。当时间大于  $10^5 \sim 10^6 \mu\text{s}$  时，随加压时间的增加，击穿电压明显下降，这只能用发展较慢的热过程来解释，属于热击穿。当电压作用时间更长时，击穿电压仅为 1min 工频击穿电压（幅值）的几分之一，此时是由于绝缘老化，绝缘性能降低后发生了电化学击穿。

### 2. 电场均匀程度和介质厚度

在均匀电场中，固体电介质的击穿电压要高于不均匀电场中的击穿电压，且其击穿电压随着介质厚度的增加近似地呈线性增加；在不均匀电场中，介质厚度越大，电场越不容易均

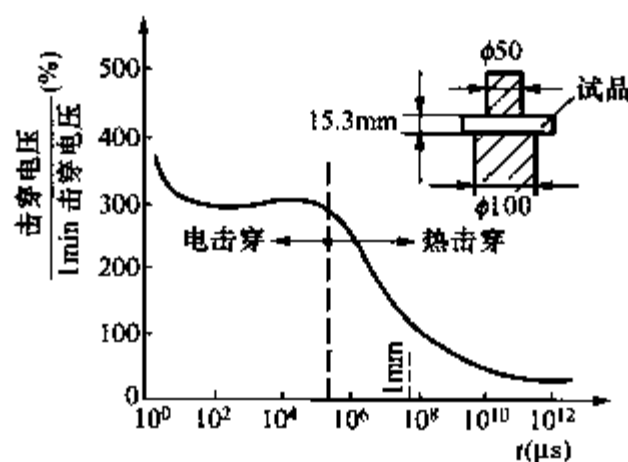


图 2-21 油浸电工纸板的击穿电压与电压作用时间的关系

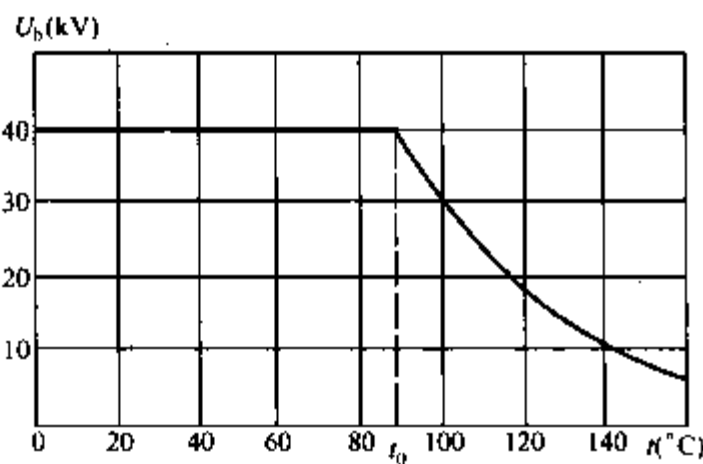


图 2 - 22 工频电压下电瓷的击穿电压与温度的关系

匀，击穿电压不再随厚度的增加而线性增加。值得注意的一点是，当介质厚度增加到散热困难以致出现热击穿时，再靠继续增加厚度来提高击穿电压就没有多大意义了。

3. 温度

当环境温度较低时，固体电介质的击穿电压与温度几乎无关，属于电击穿；当环境温度高到一定程度，电击穿转为热击穿时，击穿电压大幅度下降，如图 2 - 22 所示。且环境温度越高，热击穿电压越低。对于不同材料，临界温度  $t_0$  是不同的，即使是同一材料， $t_0$  值也会

因介质的厚度、冷却条件和所加电压性质等因素的不同而在很大范围内变动。

4. 电压种类

在相同条件下，固体电介质在直流、交流和冲击电压下的击穿电压往往是不同的。在直流电压下，固体电介质的损耗（主要为电导损耗）比工频交流电压下的损耗（除电导损耗外，还包括极化损耗甚至还有游离损耗）小，电介质发热少，因此直流击穿电压比工频击穿电压（幅值）高。而在交流电压下，工频交流击穿电压要高于高频交流击穿电压，因为高频下局部放电严重，发热也严重，使其击穿电压最低。在冲击电压下，由于电压作用时间极短，热的效应和电化学的影响来不及起作用，因此击穿电压比工频交流和直流下都高。

5. 受潮

固体电介质受潮后其击穿电压的下降程度与材料的吸水性有关。对不易受潮的电介质，如聚乙烯、聚四氟乙烯等，受潮后击穿电压下降一半左右；对易受潮的电介质，如棉纱、纸等纤维材料，受潮后击穿电压仅为干燥时的几百分之一。所以高压电气设备的绝缘在制造时应注意烘干，在运行中要注意防潮，并定期检查受潮情况。

6. 累积效应

由于固体电介质属于非自恢复绝缘，若每次施加某一电压时，都会使绝缘产生一定程度的损伤，那么在多次施加同样电压时，绝缘的损伤会逐步积累，这称为累积效应。显然，累积效应会使固体电介质的绝缘性能劣化，导致击穿电压下降。因此在确定电气设备试验电压和试验次数时应注意到这种累积效应，而在设计绝缘结构时也应留有一定的裕度。

7. 机械负荷

均匀和致密的固体电介质在弹性限度内，击穿电压与其机械变形无关；但对某些具有孔隙的不均匀固体电介质，机械应力和变形对其击穿电压影响较大。机械应力可能使电介质中的孔隙减少或缩小，从而使击穿电压提高；也可能使某些原来较完整的电介质产生开裂、松散，如该介质放在气体中，则气体将填充到裂缝内，从而使击穿电压下降。

三、提高固体电介质的击穿电压的措施

1. 改进绝缘设计

采用合理的绝缘结构，使各部分绝缘的耐电强度与其所承担的场强有适当的配合；改善电极形状及表面光洁度，尽可能使电场分布均匀。使边缘效应减小到最小程度，改善电极与

电介质的接触状态，消除接触处的气隙或使接触处的气隙不承受电位差；改进密封结构，确保可靠密封等。

### 2. 改进制造工艺

尽可能地清除固体电介质中残留的杂质、气泡、水分等，使固体电介质尽可能均匀致密。这可通过精选材料、改善工艺、真空干燥、加强浸渍（油、胶、漆等）等方法来达到。

### 3. 改善运行条件

注意防潮，防止尘污和各种有害气体的侵蚀，加强散热冷却（如自然通风、强迫通风、氢冷、油冷、水内冷等）。

## 第四节 电介质的老化

电气设备的绝缘在运行中受到电场、高温、机械力等作用将产生一系列的化学、物理变化，以致机械性能逐渐变差，强度逐渐变弱，甚至丧失绝缘性能，这种过程称为电介质的老化。

电介质老化主要可分为三类：电老化、热老化及环境老化。环境老化是由光、氧气、臭氧及污秽等因素引起，主要对暴露在大气中的绝缘影响较大；对绝大多数电气设备的绝缘来讲，主要是电老化和热老化。

### 一、电老化

电介质在电场的长时间作用下，其物理、化学性能会逐渐发生不可逆的劣化，最终导致电介质的击穿，这个过程称为电老化。

电老化的产生主要是由于高压电气设备绝缘内部不可避免地存在有某些缺陷（如固体绝缘中的气隙或液体绝缘中的气泡）。这些气隙、气泡在交变电场作用下的局部场强达到一定值以上时，就会发生局部放电；或者电介质在直流电压的长期作用下，即使所加电压远低于局部放电的起始电压，由于介质内部进行着电化学过程，电介质也会逐渐老化，最终导致击穿。

### 二、热老化

电介质在长期受热的情况下，其绝缘性能会发生不可逆的劣化，这就是电介质的热老化。液体电介质的热老化是由于介质在热作用下发生了缓慢的化学变化（主要是氧化）所致，主要表现为酸价升高，颜色加深，粘度增大，出现沉淀物，绝缘性能下降。固体电介质的热老化是由于介质在受热情况下发生了热裂解、氧化裂解以及低分子挥发物逸出等所致，主要表现为失去弹性，变硬，变脆，机械强度降低，有的表现为变软，发粘，变形，失去机械强度，与此同时介质电导变大，介质损耗增加，击穿电压降低，绝缘性能变坏。

热老化的进程与电介质的工作温度有关，温度升高热老化过程加快。各种电介质都有一定的耐热性能，电介质的最高允许温度是由其耐热性能决定的。为了保证绝缘具有一定的、经济合理的工作寿命，通常规定了各类绝缘材料的最高允许温度，在运行中电介质的温度一般不允许超过其最高允许温度。国际电工委员会将各种电工绝缘材料按其耐热程度划分成七个耐热等级，并确定各级绝缘材料的最高持续工作温度，如表 2-2 所示。

表 2 - 2 电工绝缘材料的耐热等级

级别	最高持续温度（℃）	材 料 举 例
Y (O)	90	未浸渍过的木材、棉纱、天然丝和纸等或其组合物；聚乙烯、聚氯乙烯、天然橡胶
A	105	矿物油及浸入其中的 Y 级材料；油性漆、油性树脂漆及其漆包线
E	120	由酚醛树脂、糠醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂制成的塑料、胶纸板、胶布板；聚脂薄膜及聚脂纤维；环氧树脂；聚胺脂及其漆包线；油改性三聚氰胺漆
B	130	以合适的树脂或沥青浸渍、粘合或涂复过的或用有机补强材料加工过的云母、玻璃纤维、石棉等的制品；聚脂漆及其漆包线；使用无机填充料的塑料
F	155	用耐热有机树脂或漆所粘合或浸渍的无机物（云母、石棉、玻璃纤维及其制品）
H	180	硅有机树脂、硅有机漆或用它们粘合或浸渍过的无机材料；硅有机橡胶
C	220	不采用任何有机粘合剂或浸渍剂的无机物，如云母、石英、石板、陶瓷、玻璃或玻璃纤维、石棉水泥制品、玻璃云母模压品等；聚四氟乙烯塑料

如果材料使用温度超过表 2 - 2 中的规定，绝缘材料就将迅速老化，寿命大大缩短。实验表明，对 A 级绝缘，温度每增加 8℃，则寿命缩短一半左右，这通常称为热老化的 8℃ 原则。对 B 级和 H 级绝缘材料而言，当温度每升高 10℃ 和 12℃ 时，寿命也将缩短一半。

第五节 组合绝缘的击穿特性

高压电气设备的绝缘除应具有优异的电气性能外，还应同时具有良好的热性能、机械性能及其他一些物理—化学特性。单一品种的电介质是很难同时满足以上要求的，所以实际电气设备的绝缘通常都不是由单一的电介质构成的，而是由多种电介质组合而成。例如变压器的外绝缘是由套管的瓷套和周围的空气组成的，而其内绝缘则是由纸、布带、胶木筒、变压器油等多种固体和液体电介质联合组成的；在电机中是用由云母、胶粘剂、补强材料和浸渍剂组合成的绝缘。组合绝缘的电气强度不仅取决于所用各种电介质的绝缘强度，而且还与所用各种电介质的相互配合有关。在各种组合绝缘方式中又以油浸纸的油纸绝缘方式用得最多。

一、组合绝缘的介电常数与介质损耗

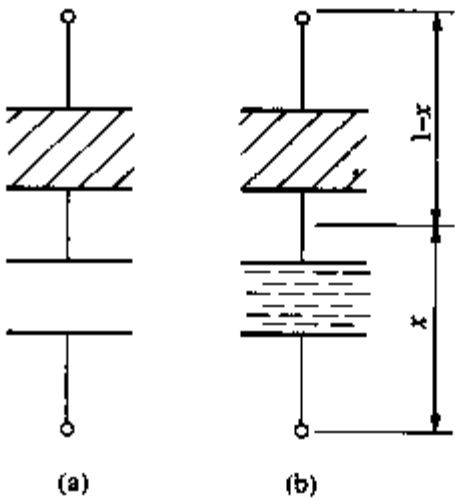


图 2 - 23 串联回路  
(a) 浸渍前；(b) 浸渍后

1. 介电常数

对油浸纸的组合绝缘常近似按串联介质处理，如图 2 - 23 所示。如果未浸油前的气隙所占体积比为  $x$ ，假设浸渍非常理想，则浸油后油所占的体积比也为  $x$ ，而固体电介质所占的体积比为  $1 - x$ 。

对平板电极，设介质总厚度为  $d$ ，则体积比可折算成厚度比，单位面积的电极间电容  $C$  为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_x} \tag{2 - 17}$$

其中， $C_s$  为固体电介质的电容； $C_x$  为气隙或浸渍介质的电容。

按平板电极电容计算公式，有

$$\frac{1}{\frac{\epsilon \epsilon_0}{d}} = \frac{1}{\frac{\epsilon_s \epsilon_0}{(1-x)d}} + \frac{1}{\frac{\epsilon_x \epsilon_0}{xd}} \quad (2-18)$$

可解得组合绝缘的相对介电常数  $\epsilon$  为

$$\epsilon = \frac{\epsilon_s}{(1-x) + \frac{x\epsilon_s}{\epsilon_x}} \quad (2-19)$$

其中,  $\epsilon_s$  为固体电介质的相对介电常数;  $\epsilon_x$  为浸渍介质的相对介电常数。

## 2. 介质损耗

按照上述方法, 同样可以得到组合绝缘的总介质损失角正切为

$$\tan \delta = \frac{\tan \delta_s}{1 + \frac{x\epsilon_s}{(1-x)\epsilon_x}} + \frac{\tan \delta_x}{1 + \frac{(1-x)\epsilon_x}{x\epsilon_s}} \quad (2-20)$$

其中,  $\tan \delta_s$  为固体电介质的介质损失角正切;  $\tan \delta_x$  为浸渍介质的介质损失角正切。

## 二、组合绝缘的击穿特性

组合绝缘的整体击穿电压取决于外加电压在组合绝缘中各电介质上的电压分布。对于常见的由多种电介质构成的层叠绝缘, 理想的电压分布应该是, 各层电介质所承受的场强与该层介质的耐电强度成正比, 这样整个组合绝缘的电气强度最高, 各层绝缘材料的利用也最合理、最充分。

各层绝缘所承受的电压与绝缘材料的特性和作用电压的类型有关。在直流电压下, 各层绝缘分担的电压与其绝缘电阻成正比, 即各层中的电场强度与其电导率成反比; 而在交流和冲击电压下, 各层介质所分担的电压与其电容成反比, 即各层中的电场强度与其介电常数成反比。因此, 直流电压下应把电气强度高、电导率大的绝缘材料用在电场最强的地方; 而在交流电压下, 则应把电气强度高、介电常数大的介质用在电场最强的地方。

下面以油纸绝缘为例, 讨论组合绝缘的击穿特性。油纸绝缘广泛应用于电容器、电缆、套管、电流互感器、某些变压器及高压电机中。油纸绝缘的优点主要是优良的电气性能, 干纸的耐电强度仅为  $10 \sim 13 \text{ kV/mm}$ , 纯油的耐电强度也仅为  $10 \sim 20 \text{ kV/mm}$ , 二者组合以后, 由于油填充了纸中薄弱点的空气隙, 纸在油中又起了屏障作用, 从而使总体耐电强度提高很多, 油纸绝缘工频短时耐电强度可达  $50 \sim 120 \text{ kV/mm}$ 。

油纸绝缘的击穿过程和一般固体电介质的一样, 可分为短时电压作用下的电击穿、稍长时间电压作用下的热击穿以及更长时间电压作用下的电化学击穿。

油纸绝缘的短时电气强度很高, 但因组合绝缘是由多种不同介质组成, 在不同介质的交界处, 或层与层、带与带交接处等都容易出现气隙, 因而容易产生局部放电。局部放电对油纸绝缘的长期电气强度威胁很大, 它对油浸纸有着电、热、化学等腐蚀作用, 十分有害, 而大多数有机介质耐局部放电的性能都很差。因而油纸绝缘的电气性能应满足下述要求:

- (1) 在工作电压下不发生有害的局部放电;
- (2) 在工频试验电压下不发生强烈的局部放电, 不击穿, 不闪络;
- (3) 在雷电冲击试验电压下不击穿, 不闪络。

油纸绝缘的长时耐电强度取决于它的工作场强; 短时耐电强度取决于它的试验场强。纸的密度越大, 相对介电常数  $\epsilon_r$  就越大, 这样分配在其串联的油层 (或气隙) 上的场强将增

大,油层较易发生局部放电,于是油纸绝缘整体的局部放电电压下降。如果选用介电常数较小的纸或选用介电常数较大的浸渍剂,就可降低浸渍剂中的场强,改善局部放电性能。

油纸绝缘在直流电压下的击穿电压常为工频电压(幅值)下的2倍以上,这是因为工频电压下局部放电、损耗等都比直流电压下多。

综上所述,将多种介质进行组合应用时,应尽可能使它们各自的优缺点进行互补,扬长避短;同时还应采取合理的工艺措施,将每层介质的接缝以及介质与电极界面的过渡处理好;在组合绝缘中,各部分的温度也可能存在较大差异,所以在设计组合绝缘结构时,还应注意温度差异对各层介质电气特性和电压分布的影响。

## 小 结

极化、电导、损耗及击穿是电介质的基本电气特性,与之相应的物理参数分别为相对介电常数 $\epsilon_r$ ,电导率 $\gamma$ ,介质损耗因数 $\tan\delta$ 和击穿电压 $U_b$ ,它们的大小可用来综合判断电介质的绝缘性能。

电介质的极化可分为无损极化和有损极化两大类。无损极化包括电子位移极化和离子位移极化,有损极化包括转向极化和夹层极化。电介质的电导与金属的电导有着本质的区别。电介质电导是离子性的,数值很小,具有正的温度系数,而金属的电导是电子性的,数值很大,具有负的温度系数。电介质的损耗包括电导损耗、极化损耗和游离损耗三种形式,直流电压下电介质的损耗仅为电导损耗,而交流电压下电介质的损耗既有电导损耗又有极化损耗,当电压超过一定数值时,还会出现游离损耗。

纯净液体电介质的击穿属于电击穿,而含有杂质的液体电介质的击穿则属于热击穿,因此杂质(特别是气泡、水分和纤维)是影响液体电介质击穿电压的重要因素。

固体电介质的击穿与电压作用时间有很大的关系,随电压作用时间的不同,固体电介质的击穿有电击穿、热击穿和电化学击穿三种形式。

根据老化的机理不同,电介质的老化主要有电老化和热老化。老化会使电介质的击穿电压下降,缩短绝缘的使用寿命。

组合绝缘的耐电强度不仅取决于各层介质的电气特性,还与各层介质之间的相互配合是否得当有关。组合绝缘中各层介质所承受的电场强度应与其耐电强度成正比。

## 习 题

- 2-1 电介质有哪些基本的电气特性?分别用哪些物理参数来表征?
- 2-2 电介质电导与金属电导有何区别?
- 2-3 什么是吸收现象?有何实际意义?
- 2-4 在电介质的三支路等值电路中,各支路代表的物理意义是什么?两支路并联等值电路中的电阻是否为电介质的绝缘电阻?
- 2-5 说明气体、液体和固体电介质的击穿机理并比较其击穿场强数量级的高低。

### 第三章 电气设备绝缘的检测和诊断

电气设备在制造、运输、安装、检修过程中,有可能因发生意外事故而残留有潜伏性缺陷;在长期运行过程中,又会受到电场、导体发热、机械外力损伤、化学腐蚀及大气条件等因素的影响,使其绝缘性能劣化,严重的会造成设备损坏。这将直接影响到电力系统运行的稳定性和可靠性,因此必须对设备的绝缘进行检测和诊断,以掌握绝缘状况,对其是否存在缺陷或隐患、能否继续运行、是否需采取处理措施以及是否为寿命终结做出判断,预防事故的发生。

绝缘缺陷通常分为两类:一是集中性缺陷,指缺陷集中于绝缘的某个或某几个部分。如绝缘子瓷质开裂、绝缘局部磨损、绝缘内部气泡、局部受潮等,它又分为贯穿性缺陷和非贯穿性缺陷,这类缺陷的发展速度较快,因而具有较大的危险性;另一类是分布性缺陷,指由于受潮、过热、动力负荷及长时间过电压的作用导致的电气设备整体绝缘性能下降,如绝缘整体受潮、老化、变质等,这是一种普遍性的劣化,是经过缓慢演变而出现的。

绝缘试验按照其对被试绝缘的危险性可分为两类:一类为非破坏性试验,也称检查性试验或绝缘特性试验,是指在较低电压下或用其他不会损坏绝缘的方法来检测绝缘除电气强度以外的电气性能,这类试验的目的是判断绝缘状态,及时发现可能的劣化现象,主要包括绝缘电阻测量、直流泄漏电流测量和介质损失角正切值测量及局部放电测量等;另一类为破坏性试验,是指在各种较高的电压下进行的试验,也称耐压试验,它考核绝缘的电气强度,试验过程中有可能给绝缘造成一定的损伤,主要包括交流耐压试验、直流耐压试验、雷电冲击耐压试验及操作冲击耐压试验。这两类试验是相辅相成的,实际中应先进行非破坏性试验,再进行破坏性试验,若非破坏性试验表明绝缘有不正常情况,则必须查明原因并加以消除后才能再进行破坏性试验,以避免造成不应有的击穿。

常规绝缘试验是在停电状态下进行的,而停电测试往往不能正确及时地反映设备绝缘的运行工况以及是否存在隐患。采用在线检测技术可以对运行工况下的设备状态进行连续、实时的监测,在线检测通常是自动进行的,是基于计算机网络、先进传感器技术和专家诊断系统之上的综合体系。而通常所说的带电检测可以认为是在线检测的一种形式,它是指采用专门的检测仪器,对运行中的设备定时或根据需要进行检测。

#### 第一节 绝缘电阻和吸收比的测量

测量电气设备的绝缘电阻,是检测绝缘状态的最简便和最常用的方法之一,通过测量可以发现绝缘整体或贯通性受潮、脏污,绝缘油劣化,绝缘击穿和严重老化等缺陷。绝缘电阻通常采用兆欧表(也称摇表)进行测量。

##### 一、兆欧表的工作原理

兆欧表是利用流比计的原理构成的。图3-1所示为兆欧表的原理接线图。图中G为电源,是由手摇(或电动)直流发电机或交流发电机经晶体二极管整流构成的;电压线圈LV

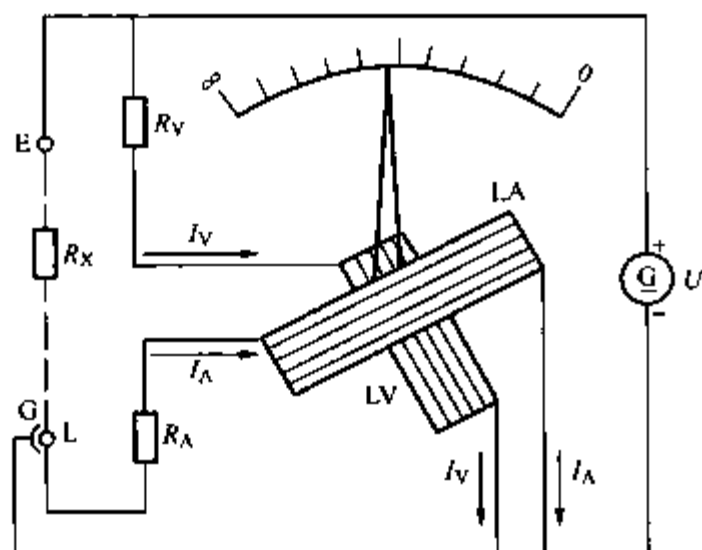


图 3-1 兆欧表的原理接线图

和电流线圈  $LA$  绕向相反、相互垂直且固定在同一转轴上，它们处在同一个永久磁场中（图中未画出），由于没有弹簧游丝，当没有电流通过时，指针可以停留在任意位置； $R_v$ 、 $R_A$  分别为分压电阻（包括电压线圈的电阻）和限流电阻（包括电流线圈的电阻）。

测量时，接地端子  $E$  接被试品的接地端、外壳或法兰等处，线路端子  $L$  接被试品的另一极（绕组、芯柱或其他）。摇动手摇发电机，直流电压就加到两个并联支路上，电流通过两个线圈，在同一磁场中产生方向相反的转动力矩，在两个

力矩差的作用下，线圈带动指针偏转，直至两个力矩平衡为止。当到达平衡时，指针偏转的角度  $\alpha$  与流过  $I_v$  和  $I_A$  中的电流的比值有关，即

$$\alpha = F\left(\frac{I_v}{I_A}\right) \quad (3-1)$$

而  $I_v = \frac{U}{R_v}$ ， $I_A = \frac{U}{R_A + R_x}$ ， $R_x$  为被试品的绝缘电阻，所以

$$\alpha = F\left(\frac{I_v}{I_A}\right) = F\left[\frac{U/R_v}{U/(R_A + R_x)}\right] = F\left(\frac{R_A + R_x}{R_v}\right) = F'(R_x) \quad (3-2)$$

可见指针偏转角  $\alpha$  直接反映  $R_x$  的大小。当兆欧表分压电阻和限流电阻一定时， $R_v$  和  $R_A$  均为常数，故指针偏转角  $\alpha$  的大小仅由被试品的绝缘电阻  $R_x$  决定。

接线端子  $G$  称为屏蔽端。它直接与电源的负极相连，起屏蔽表面泄漏电流的作用。当我们希望单独测量体积绝缘电阻时，可以在需要屏蔽的位置设置一个金属屏蔽环极，并将此环极接到兆欧表的端子  $G$ ，这样就使被试品表面的泄漏电流到了屏蔽环极后直接从  $G$  端子流回电源，而不流经测量机构，防止造成测量误差。

常用的兆欧表的额定电压有 500、1 000、2 500、5 000V 等几种；通常额定电压为 1kV 及以上的电气设备要选用 2 500V 或 5 000V 的兆欧表，额定电压为 1kV 以下的电气设备用 500V 或 1 000V 的兆欧表。

目前现场已广泛采用数字式兆欧表，它采用整流电源，试验人员可根据需要选择电压量程，当在被试品绝缘上施加电压时，取被试品电压、电流信号经 A/D 转换，简单数值计算，用液晶数显方式给出结果。

## 二、绝缘电阻和吸收比的测量

由第二章第一节可知，在电气设备的绝缘上加上直流电压后，流过绝缘的电流要经过一个过渡过程才达到稳态值，因此绝缘电阻也要经过一定的时间才能达到稳定值，通常认为加压 60s 时，通过绝缘的吸收电流已衰减至接近于零，所以规定加压 60s 时所测得的数值为被试品的绝缘电阻。

对电容量较大的设备，如电机、变压器等，由于其绝缘均为多层介质，绝缘良好时存在明显的吸收现象，稳态绝缘电阻值也较高；绝缘受潮或存在某些穿透性的导电通道时，绝缘电阻达到稳态值所需的时间大大缩短，稳态值也低。因此，我们可以利用绝缘电阻值随时间变化的关系来反映绝缘的状况。通常将加压 60s 时测得的绝缘电阻值与加压 15s 时测得的绝

缘电阻值之比, 定义为吸收比  $K$ , 即

$$K = \frac{R_{60''}}{R_{15''}} \quad (3-3)$$

《电力设备预防性试验规程》中规定:  $K \geq 1.3$  为绝缘干燥;  $K < 1.3$  为绝缘受潮。由于吸收比  $K$  是同一被试品的两个绝缘电阻之比, 它与被试绝缘的尺寸无关, 只取决于绝缘本身的特性, 所以更有利于反映绝缘的状态。

经验表明吸收比在工程应用中是存在一定局限性的。对于电容量较大的设备是适用的, 但对电容量小的设备, 由于吸收现象不明显, 无实用价值。近几年来, 由于干燥工艺的改进, 大容量变压器的吸收现象也不明显, 吸收比往往在 1.3 以下, 而这并不一定表明变压器绝缘受潮, 还要结合其他测试数据进行综合分析判断。

对于大型电机或大型电力变压器及电容器等, 由于吸收现象特别显著, 在 60s 时测得的绝缘电阻仍会受吸收电流的影响, 这时应采用加压 10min 和 1min 时的绝缘电阻值之比, 即极化指数  $PI$  作为衡量指标, 即

$$PI = \frac{R_{10'}}{R_1'} \quad (3-4)$$

规程规定, 绝缘良好时, 极化指数  $PI$  一般不小于 1.5。

### 三、测量时的注意事项

(1) 测试前应断开被试品的电源及被试品与其他设备的连线, 并对被试品进行充分的放电。

(2) 测吸收比和极化指数时, 应等电源电压达稳定后再接入被试品, 并开始计时。

(3) 读取绝缘电阻值后, 应先断开 L 端子与被试品的连线, 然后再停摇兆欧表, 以免被试品电容中所充的电荷经兆欧表放电损坏兆欧表。

(4) 测量时应记录当时的温度和湿度, 以便进行校正。在湿度较大的条件下测量时, 必须加屏蔽。

### 四、影响测量结果的主要因素

#### 1. 温度、湿度及表面脏污的影响

一般温度每下降  $10^{\circ}\text{C}$ , 绝缘电阻约增加到 1.5~2 倍。为了比较测量结果, 需要将测量结果换算成同一温度下的数值。

湿度主要影响绝缘表面泄漏电流, 由于绝缘表面吸附潮气, 形成水膜, 使绝缘电阻降低。此外, 由于某些绝缘材料的毛细管作用, 在湿度大的情况下会吸收一些水分, 也会导致电导增加, 绝缘电阻下降。

电气设备绝缘表面的脏污会使表面的绝缘电阻下降从而造成整体绝缘电阻的明显降低。

#### 2. 放电时间及感应电压的影响

每进行一次高压试验, 都应将试品充分放电, 这不仅是为了人身和设备安全, 也是为了防止测得的绝缘电阻比实际偏大。这是因为试验后, 尤其是直流试验, 由于剩余电荷的存在, 使充电电流和吸收电流比前一次测量时小, 造成吸收比减小而绝缘电阻增大, 容易引起误判断。

此外, 由于带电设备和停电设备间的电容耦合, 使得被试设备上存在感应电压, 这在 500kV 设备试验时表现的尤其突出, 会造成指针不稳定、摆动, 感应电压强烈时甚至会损

坏兆欧表,得不到真实的数值,为此必要时要采取电场屏蔽等措施。

### 五、测量结果的分析判断

对测得的绝缘电阻进行分析才能掌握设备的绝缘状态。一般来说,绝缘电阻应不小于某一容许值,并且换算到同一温度下,与历史数据(出厂、交接、历次预试、大修前后和耐压前后)比较,与同型设备、同一设备不同相之间比较,结果均不应有明显的降低或较大的差异,否则应查明原因。对较大电容量的设备如电缆、发电机、变压器等绝缘状况的分析,除绝缘电阻值的大小和变化趋势为依据外,吸收比和极化指数是主要的判据,如有明显的下降,说明绝缘劣化。

## 第二节 直流泄漏电流的测量

测量泄漏电流与测量绝缘电阻的原理基本相同,但其施加的直流电压较高,能够更有效地发现瓷瓶裂纹、夹层绝缘内部受潮及局部松散断裂、绝缘油劣化、绝缘沿面炭化等缺陷。泄漏电流测量中所用的电源一般均由高压整流设备供给,其具体接线及原理将在第四章介绍,这里先给出简单的试验接线。

### 一、试验接线

#### 1. 微安表接于高压侧

接线如图 3-2 所示,图中 TA 为自耦调压器,用来调节电压;T 为试验变压器,用来供给整流前的交流高压;V 为高压硅堆,用来整流;C 为滤波电容器,用来减小输出整流电压的脉动,当被试品的电容  $C_x$  较大时,C 可以不用,当  $C_x$  较小时,则需接入  $0.1\mu\text{F}$  左右的电容器以减小电压脉动。 $R$  为保护电阻,用来限制被试品击穿时的短路电流以保护变压器和高压硅堆,其值可按  $10\Omega/\text{V}$  选取。

这种接线适合于被试绝缘一极接地的情况。此时微安表处于高压端,不受高压对地杂散电流的影响,测量的泄漏电流较准确。但为了避免由微安表到被试品的连线上产生的电晕及沿微安表绝缘支柱表面的泄漏电流流过微安表,需将微安表及从微安表至被试品的引线屏蔽起来。由于微安表处于高压端,故给读数及切换量程带来不便。

#### 2. 微安表接于低压侧

接线如图 3-3 所示,这时微安表接在接地端,读数和切换量程安全、方便,而且高压部分对外界物体的杂散电流入地时都不会流过微安表,所以不用加屏蔽,测量比较精确。但这种接线要求被试绝缘的两极都不能接地,仅适合于那些接地端可与地分开的电气设备。

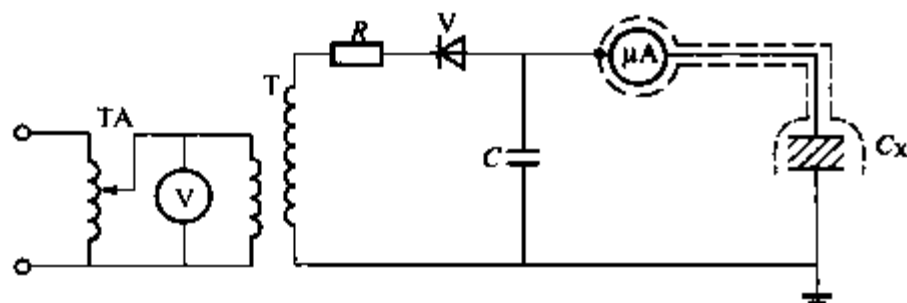


图 3-2 微安表接于高压侧的接线图

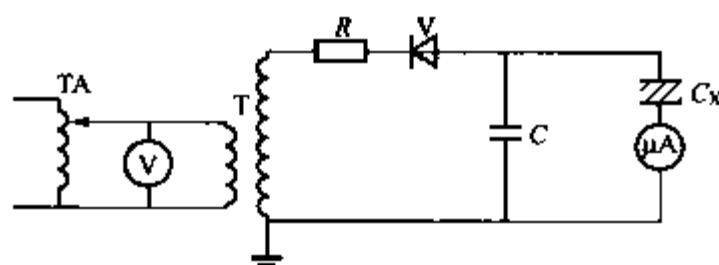


图 3-3 微安表接于低压侧的接线图

### 二、微安表的保护

试验电压总是存在脉动的,试验时交流分量就会通过微安表,使微安表指针摆动,甚至

使微安表过热烧坏（因它只反映直流数值，实际上交流数值也流经线圈），且在试验过程中，被试品放电或击穿都有不能容许的冲击电流流经微安表，因此需对微安表加以保护。常用的保护接线如图 3-4 所示，在微安表回路中串联一个增压电阻  $R$ ，当流过微安表的电流超过某一定值时，电阻  $R$  上的压降将引起放电管  $F$  放电从而保护微安表；电感线圈  $L$  在被试品击穿时能限制冲击电流并加速放电管的动作，通常取值为  $0.1 \sim 1.0\text{H}$ ；并联电容  $C$  用以旁路交流分量，减少微安表指针的摆动； $K$  是短路微安表的开关，读数时断开。

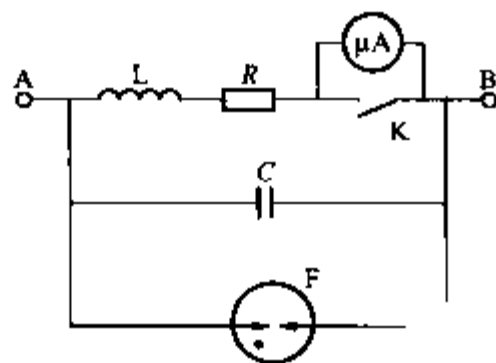


图 3-4 微安表的保护电路图

### 三、测量时的注意事项

- (1) 试验时微安表必须进行保护。
- (2) 试验电容量小的被试品应加稳压电容。

(3) 试验结束后，应对被试品进行充分放电。对大电容量试品，放电时应通过适当的放电电阻，如果直接对地放电，可能产生频率极高的振荡过电压，对被试品的绝缘有危害。放电电阻视试验电压高低和被试品的电容量大小而定，必须有足够的电阻值和热容量。

### 四、影响测量结果的主要因素

#### 1. 温度的影响

温度对泄漏电流的测量结果影响是显著的，温度升高，泄漏电流增大。测量最好在被试品温度为  $30 \sim 80^\circ\text{C}$  时进行，因为在这样的温度范围内泄漏电流变化较明显，而低温时变化较小。

#### 2. 表面泄漏电流的影响

表面泄漏电流的大小主要决定于被试品的表面状况，如表面受潮、脏污等。当空气湿度大时，表面泄漏电流会明显增大，甚至远大于体积泄漏电流；而被试品表面如果脏污则更易于吸潮，使表面泄漏电流进一步增加，所以试验前必须擦净表面，并应用屏蔽电极。

#### 3. 残余电荷的影响

被试品绝缘中的残余电荷是否放尽，直接影响泄漏电流的数值，因此，试验前对被试品必须进行充分放电。

### 五、测量结果的分析判断

现行《标准》（现场试验一般以交接标准和预防性试验规程为准）中对泄漏电流有规定的设备，应按是否符合规定值来判断。对《标准》中无明确规定的设备，应将测得的泄漏电流值换算到同一温度下与历次试验结果进行比较，同一设备的各相间相互比较、同类设备之间相互比较，视其变化来分析判断。对于重要设备（如主变压器、发电机等），可作出电流随时间变化的关系曲线  $i = f(t)$  进行分析。

## 第三节 介质损失角正切值的测量

介质损失角正切值  $\tan\delta$  是绝缘品质的重要指标，测量  $\tan\delta$  是判断电气设备绝缘状态的一种灵敏有效的方法。通过测量可以发现电气设备绝缘整体受潮、劣化变质以及小体积被试品中的严重局部性缺陷。通常采用高压平衡电桥（西林电桥）进行测量。

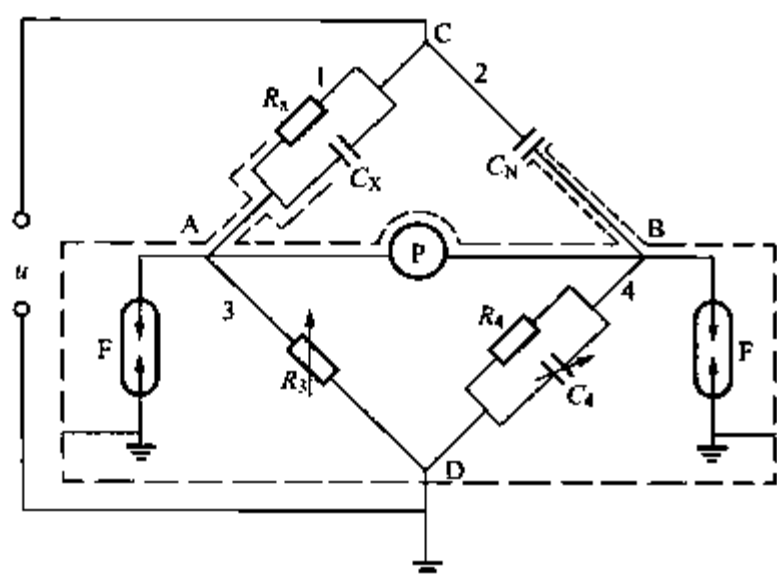


图 3-5 高压西林电桥的原理接线图

### 一、QS1 型西林电桥的基本原理

西林电桥是一种交流电桥，配以合适的标准电容器，可以在高电压下测量电气设备的电容值和  $\tan\delta$  值。QS1 型西林电桥的原理接线如图 3-5 所示，它有四个桥臂，桥臂 1 为被试品， $C_x$ 、 $R_x$  为被试品的电容和电阻；桥臂 2 为高压标准电容器  $C_N$ ；桥臂 3、4 处在电桥本体内，分别为可调无感电阻  $R_3$  和定值无感电阻  $R_4$  与可调电容器  $C_4$  的并联支路， $P$  为交流检流计。

在交流电压  $u$  的作用下，调节  $R_3$  和  $C_4$ ，

使电桥达到平衡，即通过检流计  $P$  的电流为零，此时有

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (3-5)$$

式中

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x}, Z_2 = \frac{1}{j\omega C_N}, Z_3 = R_3, Z_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}$$

代入式 (3-5)，经过复数运算整理得

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \omega C_4 R_4 \quad (3-6)$$

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \tan^2\delta} \quad (3-7)$$

由于  $\tan\delta \ll 1$ ，所以

$$C_x \approx C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (3-8)$$

对于工频电源， $\omega = 100\pi$ ，为计算方便，在制造电桥时取  $R_4 = \frac{10^4}{\pi} \Omega$ ，于是由式 (3-6) 可得

$$\tan\delta = 10^6 C_4 \quad (3-9)$$

即  $\tan\delta$  的数值等于  $C_4$  的法拉数乘上  $10^6$ ，若  $C_4$  以  $\mu F$  为单位，则在数值上  $\tan\delta = C_4$ 。为方便读数，实际中将电桥面板上可调电容器  $C_4$  的数值直接标记成被试品的  $\tan\delta(\%)$  值。

通常桥臂阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$  要比  $Z_3$  和  $Z_4$  大得多，所以工作电压主要作用在  $Z_1$  和  $Z_2$  上，因此它们被称为高压臂，而  $Z_3$  和  $Z_4$  称为低压臂，其作用电压往往只有几伏。但如果被试品或标准电容发生闪络或击穿时，在 A、B 点可能出现高电位，为了确保人身和设备安全，在 A、B 两点对地之间各并联一个放电管，其放电电压约为 100~200V。

上面介绍的是西林电桥的正接线，被试品处于高压侧，两端均对地绝缘，此时桥体处于低压侧，操作安全方便；但现场电气设备的外壳一般都是固定接地的，所以只能改用图 3-6 所示的反接线，此时检流计  $P$  及调节元件  $R_3$ 、 $C_4$  均处于高压端，故必须保证足够的绝缘强度和采取可靠的保护措施，以确保试验人员和仪器的安全。

### 二、测量时的注意事项

(1) 无论采用何种接线方式，电桥本体必须良好接地。

(2) 为防止检流计损坏, 应在检流计灵敏度最低时接通或断开电源。

(3) 对能分开的被试品应尽量分开测试。因为当体积较大的设备中存在局部缺陷时, 测量总体的  $\tan\delta$  值不易反映出这些局部缺陷; 而对体积较小的设备, 测  $\tan\delta$  值就容易发现局部缺陷。

三、影响测量结果的主要因素

1. 外界电场干扰

外界电场干扰主要是干扰电源 (包括试验用高压电源和试验现场高压带电体) 通过带电设备与被试设备之间的电容耦合造成的。图 3-7 所示为电场干扰的示意图。干扰电流  $I_g$  通过耦合电容  $C_0$  流过被试设备电容  $C_X$ , 于是在电桥平衡时所测得的被试品支路的电流  $I_X$ , 由于加上  $I_g$  而变成了  $I'_X$ 。在干扰电流  $I_g$  大小不变而干扰源的相位连续变化时,  $I_g$  的轨迹为以被试品电流  $I_X$  的末端为圆心, 以  $I_g$  为半径的一个圆, 如图 3-8 所示。在某些情况下, 当干扰结果使  $I_g$  的相量端点落在阴影部分的圆弧上时,  $\tan\delta$  值将变为负值, 这时电桥在正常接线下已无法达到平衡, 只有把  $C_4$  从桥臂 4 换接到桥臂 3 与  $R_3$  并联 (即将倒向开关打到  $-\tan\delta$  的位置), 才能使电桥平衡, 并按照新的平衡条件计算出  $\tan\delta = -\omega C_4 R_3$ 。

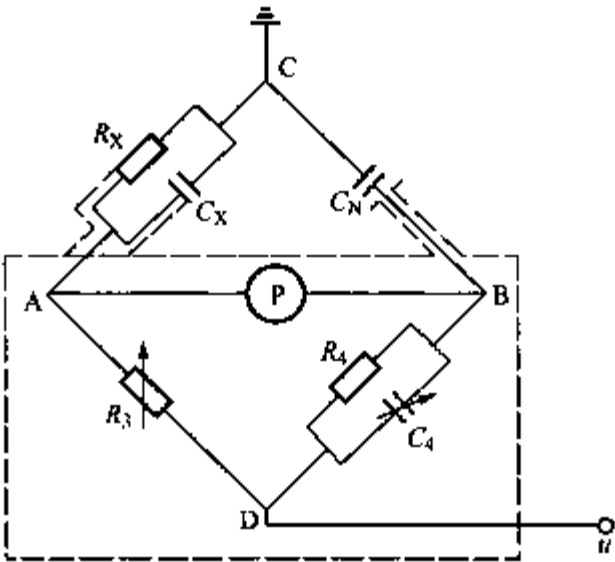


图 3-6 反接线原理接线图

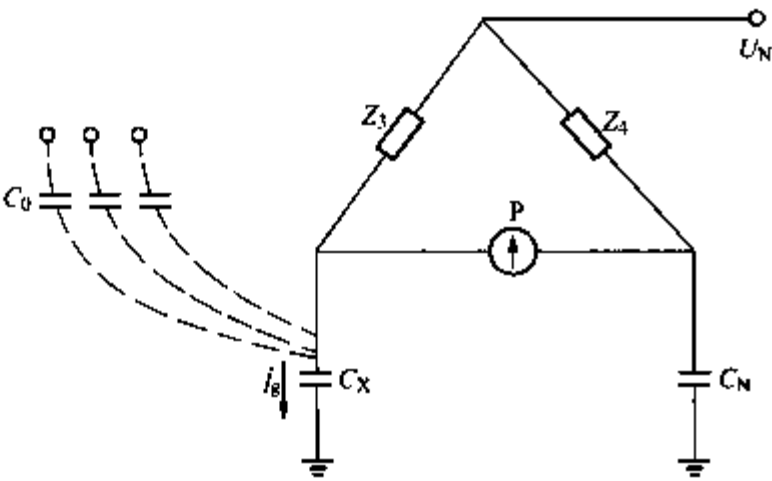


图 3-7 电场干扰示意图

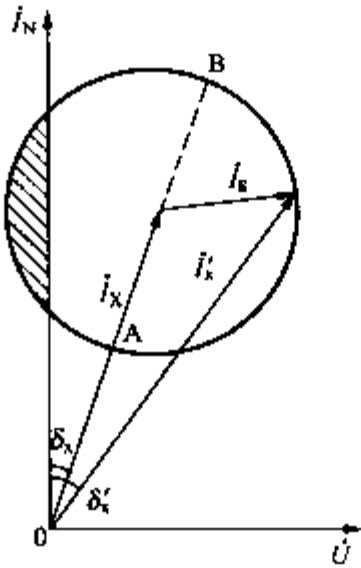


图 3-8 有电场干扰时的相量图

为避免干扰, 最根本的办法是尽量离开干扰源, 或者加电场屏蔽, 即用金属屏蔽罩或网将被试品与干扰源隔开, 并将屏蔽罩与电桥本体相连, 以消除  $C_0$  的影响。但在现场中往往难以实现。对于同频率的干扰, 还可以采用移相法或倒相法来消除或减小对  $\tan\delta$  的测量误差。

移相法是现场常用的消除干扰的有效方法, 其基本原理是: 利用移相器改变试验电源的相位, 使被试品中的电流  $I_X$  与  $I_g$  同相或反相, 此时  $\delta_X = \delta'_X$ , 因此测出的是真实的  $\tan\delta$  值, 即  $\tan\delta = \omega C_4 R_4$ , 通常在试验电源和干扰电流同相和反相两种情况下分别测两次, 然后取其平均值。而正、反相两次所测得的电流分别为  $I_{OA}$  和  $I_{OB}$ , 因此被试品电容的实际值应为正、反相两次测得的平均值。

倒相法是移相法中的特例, 比较简便。测量时将电源正接和反接各测一次, 得到两组测

量结果  $C_1$ 、 $\tan\delta_1$  和  $C_2$ 、 $\tan\delta_2$ ，根据这两组数据计算出电容  $C_x$  和  $\tan\delta$ 。计算原理可参照图 3-9 所示关系。为分析方便，可假定电源的相位不变，而干扰的相位改变  $180^\circ$ ，这样得到的结果与干扰相位不变电源相位改变  $180^\circ$  是完全一致的。由图 3-9 可得到

$$\tan\delta = \frac{C_1 \tan\delta_1 + C_2 \tan\delta_2}{C_1 + C_2} \quad (3-10)$$

$$C_x = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (3-11)$$

当干扰不大，即  $\tan\delta_1$  与  $\tan\delta_2$  相差不大、 $C_1$  与  $C_2$  相差不大时，式 (3-10) 可简化为

$$\tan\delta = \frac{\tan\delta_1 + \tan\delta_2}{2} \quad (3-12)$$

即可取两次测量结果的平均值，作为被试品的介质损失角正切值。

## 2. 外界磁场的干扰

外界磁场干扰主要是测试现场附近有漏磁通较大的设备（电抗器、通信的滤波器等）时，其交变磁场作用于电桥检流计内的电流线圈回路而造成的。

为了消除磁场干扰，可设法将电桥移到磁场干扰范围以外。若不能做到，则可以改变检流计极性开关进行两次测量，用两次测量的平均值作为测量结果，以减小磁场干扰的影响。

## 3. 温度的影响

温度对  $\tan\delta$  有直接影响，影响的程度随材料、结构的不同而异。一般情况下， $\tan\delta$  是随温度上升而增加的。现场试验时，设备温度是变化的，为便于比较，应将不同温度下测得的  $\tan\delta$  值换算至  $20^\circ\text{C}$ 。应当指出，由于被试品真实的平均温度是很难准确测定的，换算方法也不很准确，故换算后往往有很大误差，因此，应尽可能在  $10\sim 30^\circ\text{C}$  的温度下进行测量。

## 4. 试验电压的影响

良好绝缘的  $\tan\delta$  不随电压的升高而明显增加，当绝缘内部有缺陷时，则  $\tan\delta$  将随试验电压的升高而明显增加。

图 3-10 示出了几种典型的情况：图中曲线 1 是绝缘良好的情况，其  $\tan\delta$  几乎不随电压的升高而增加，仅在电压很高时才略有增加。曲线 2 为绝缘老化时的示例，在气隙起始游离电压之前， $\tan\delta$  比良好绝缘的低，过了起始游离点后则迅速升高，而且起始游离电压也比良好绝缘的低。曲线 3 为绝缘中存在气隙的示例，在试验电压未达到气体起始游离电压之前， $\tan\delta$  值稳定，但电压增高气隙游离后， $\tan\delta$  急剧增大，当逐步降压后测量时，曲线出现转折，

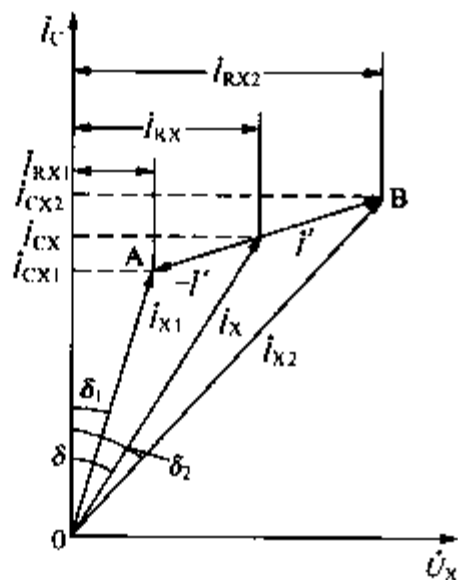


图 3-9 用倒相法消除干扰的相量图

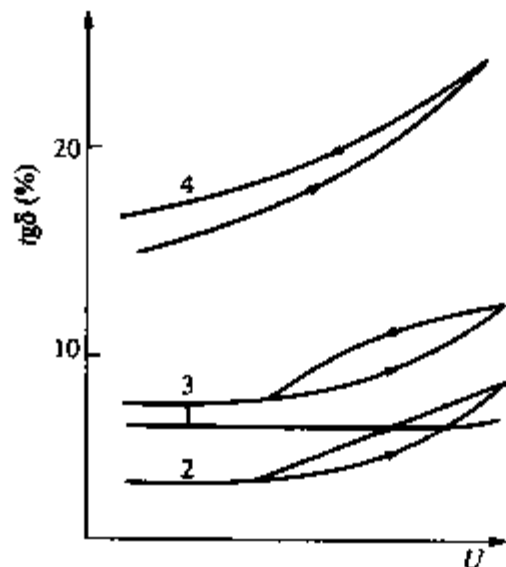


图 3-10  $\tan\delta$  与电压的关系曲线

由于气体放电可能已随时间和电压的增加而增强,故  $\tan\delta$  高于升压时相同电压下的值,直至气体放电终止,曲线才又重合,因而形成闭口环路状。曲线 4 是绝缘受潮的情况,在较低电压下,  $\tan\delta$  已较大,随电压的升高  $\tan\delta$  继续增大,在逐步降压时,由于介质损失的增大已使介质发热温度升高,所以  $\tan\delta$  不能与原数值重合,而以高于升压时的数值下降,形成开口环状曲线。

#### 5. 被试品电容量的影响

对电容量较小的设备(套管、互感器、耦合电容器等),测量  $\tan\delta$  能有效地发现局部集中性的和整体分布性的缺陷。但对电容量较大的设备(如大、中型发电机、变压器,电力电缆,电力电容器等),测量  $\tan\delta$  只能发现绝缘的整体分布性缺陷,因为局部集中性的缺陷所引起的损失增加只占总损失的极小部分,这样用测量  $\tan\delta$  的方法来判断设备的绝缘状态就很不灵敏了。对于可以分解为几个彼此绝缘的部分的被试品,应分别测量其各个部分的  $\tan\delta$  值,这样能更有效地发现缺陷。

#### 6. 表面泄漏电流的影响

被试品表面泄漏可能影响反映被试品内部绝缘状况的  $\tan\delta$  值。在被试品的  $C_x$  小时需特别注意。为了消除或减小这种影响,测试前应将被试品表面擦干净,必要时可加屏蔽。

### 四、测量结果的分析判断

根据  $\tan\delta$  测量结果对绝缘状况进行分析判断时,除与试验规程规定值比较外,还应与以往的测试结果及处于同样运行条件下的同类设备相比较,观察其发展趋势。如果测试值低于规程规定值,但增长迅速,也应认真对待,否则运行中也可能发生绝缘事故。

## 第四节 局部放电的测量

局部放电是指设备绝缘系统中有部分绝缘被击穿的电气放电现象。是由绝缘局部区域内的弱点所造成的。局部放电虽然不会立即形成贯穿性的导电通道,但它产生的物理和化学效应却会使缺陷进一步扩大,到达一定程度后,就会导致绝缘的击穿和损坏。因此,测定绝缘在不同电压下的局部放电强度和变化趋势,就能判断绝缘内部是否存在局部缺陷,预示绝缘的状况,估计绝缘电老化速度。

### 一、测量的基本原理

设在固体或液体电介质内部  $g$  处存在一个气隙或气泡,如图 3-11(a) 所示,  $C_g$  为该气隙的电容,  $C_b$  为与该气隙串联的绝缘部分的电容,  $C_s$  为其余完好绝缘部分的电容,由此可得其等值电路如图 3-11(b) 所示。其中  $g$  为放电间隙,它的击穿等值于  $g$  处气隙发生的火花放电,  $Z$  为相应于气隙放电脉冲频率的电源阻抗。

在电源电压  $u = U_m \sin\omega t$  的作用下,  $C_g$  上分到的电压为  $u_g = \frac{C_b}{C_b + C_g} U_m \sin\omega t$ , 如图 3-12(a) 中虚线所示。当  $u_g$  达到该气隙的放电电压  $U_s$  时,气隙内发生火花放电,放电产生的空间电荷建立反电场,使  $C_g$  上的电压急剧下降到剩余电压  $U_r$  时火花熄灭,完成一次局部放电。随着外加电压的继续上升,  $C_g$  重新获得充电,当  $u_g$  又达到  $U_s$  时,气隙发生第二次放电,依此类推。气隙每放电一次,其电压瞬间下降  $\Delta U_g = U_s - U_r$ , 同时产生一个对应的局部放电电流脉冲。由于发生一次局部放电过程的时间很短,约为  $10^{-8}$  s 数量级,可以认为

是瞬时完成的, 故放电脉冲电流表现为与时间轴垂直的一条直线, 如图 3-12 (b) 所示。

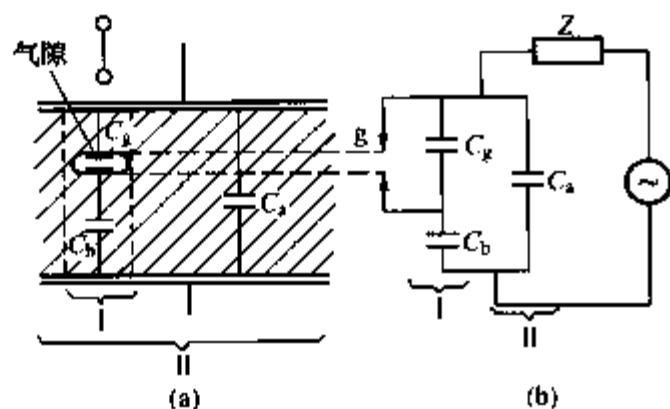


图 3-11 绝缘内部气隙局部放电的等值电路  
(a) 示意图; (b) 等值电路

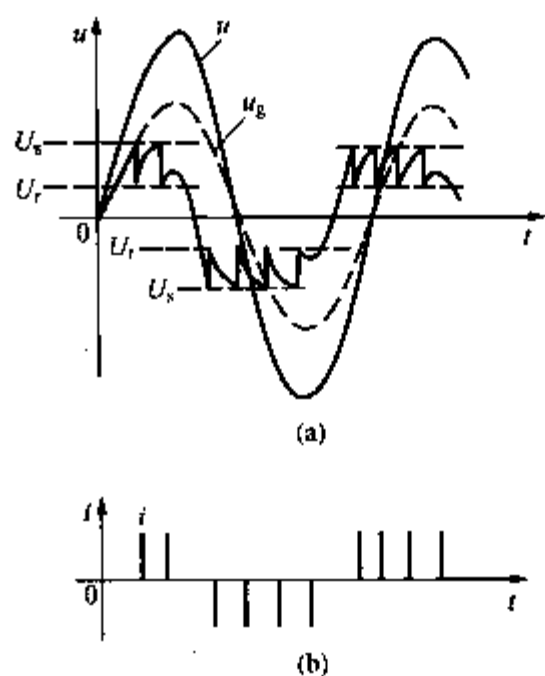


图 3-12 局部放电时的电压电流变化曲线

气隙放电时, 其放电电荷量为

$$q_r = \left( C_g + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \Delta U_g \quad (3-13)$$

因为  $C_a \gg C_b$ , 所以

$$q_r \approx (C_g + C_b) \Delta U_g = (C_g + C_b) (U_s - U_r) \quad (3-14)$$

式中,  $q_r$  为实际放电量。因  $C_g$ 、 $C_b$  等在实际中无法测定, 因此  $q_r$  很难测得。

由于气隙放电引起的电压变动  $\Delta U_g$  将按反比分配在  $C_a$  和  $C_b$  上 (因从气隙两端看,  $C_a$  和  $C_b$  串联连接), 因而  $C_a$  上的电压变动  $\Delta U_a$  为

$$\Delta U_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \Delta U_g \quad (3-15)$$

也就是说, 当气隙放电时, 被试品两端的电压会下降  $\Delta U_a$ , 这相当于被试品放掉电荷  $q$ , 而

$$q = (C_a + C_b) \Delta U_a = C_b \Delta U_g = C_b (U_s - U_r) \quad (3-16)$$

式中  $q$  为视在放电量, 通常以它作为衡量局部放电强度的一个重要参数。比较式 (3-14) 和式 (3-16) 可得

$$q = \frac{C_b}{C_g + C_b} q_r \quad (3-17)$$

由于  $C_g \gg C_b$ , 所以视在放电量  $q$  要比实际放电量  $q_r$  小得多。因它们之间存在比例关系, 因而  $q$  值可以相对地反映  $q_r$  的大小。

在交流电压作用下, 当外加电压足够高时, 局部放电在每个半周期内可以重复多次出现; 而在直流电压作用下, 情况就不同了, 这时电压的大小和极性都不变, 一旦气隙被击穿, 空间电荷会在气隙内建立起反电场, 放电熄灭, 直到空间电荷通过介质内部电导相互中和从而使反电场削减到一定程度后, 才开始第二次放电。可见, 在其他条件相同时, 直流电压下单位时间的放电次数要比交流电压时少很多, 从而使直流下局部放电引起的破坏作用也远较交流下为小。这也是绝缘在直流下的工作电场强度可以大于交流工作电场强度的原因。

之一。

## 二、局部放电的检测方法

电气设备绝缘内部发生局部放电时将伴随着出现许多外部现象,有些外部现象属于电现象,如产生电流脉冲、引起介质损耗增大、产生电磁波辐射等;有些属于非电现象,如产生光、热、噪声、气压变化和分解物等。利用这些现象可以对局部放电进行检测。根据被检测量的性质不同,局部放电的检测方法可分为电气检测法和非电检测法两大类。在大多数情况下,非电检测法的灵敏度较低,多用于定性检测,即只能判断是否存在局部放电,而不能作定量的分析。目前应用得比较广泛和成功的是电气检测法,特别是测量绝缘内部气隙发生局部放电时的电脉冲,它不仅灵敏地检出是否存在局部放电,还可判定放电强弱程度。

### 1. 非电检测法

(1) 超声波法。利用超声波检测技术来测定局部放电产生的超声波,从而分析放电的位置和放电的程度。这种方法较简单,抗干扰性能好,但灵敏度较低。若配合电气检测法,使两种方法的优点互补,则可得到很好的测量效果。

(2) 光检测法。利用光电倍增技术来测定局部放电产生的光,由此来确定放电的位置及其发展过程。这种方法灵敏度较低,局限性大,对于绝缘内部的局部放电,只有在透明介质中才能检测。目前,一种利用光纤将局部放电所发出的光量经光电传感器从设备内部引出来的整套仪器正在研究开发之中。实践证明,光检测法较适宜于暴露在外表面的电晕放电和沿面放电的检测。

(3) 热检测法。由于局部放电在放电点会发热,当故障较严重时,局部热效应明显,这时可用预先埋入的热电偶来测量各点温升,从而确定局部放电部位。这种方法既不灵敏又不能定量,因而很少在现场测量使用。

(4) 测分解物法。在局部放电作用下,可能有各种分解物或生成物出现,可以用各种色谱分析及光谱分析来确定各种分解物或生成物的成分和含量,从而判断设备内部隐藏的缺陷类型和强度。

### 2. 电气检测法

(1) 无线电干扰测量法(RIV法)。由于局部放电会产生频谱很宽的脉冲信号(从几千赫到几十兆赫),所以可以利用无线电干扰仪测量局部放电的脉冲信号。该方法已列入IEC标准中,其灵敏度也很高。

(2) 介质损耗法。由于局部放电伴随着能量损耗,所以可以用电桥来测量被试品的 $\tan\delta$ 值随外施电压的变化,由局部放电损耗变化来分析被试品的状况。

(3) 脉冲电流法。由于局部放电产生的电荷交换使被试品两端出现电压脉动,并在检测回路中引起高频脉冲电流,因此在回路中的检测阻抗上就可取得代表局部放电的脉冲信号,从而进行测量。这种方法测量的是视在放电量,灵敏度高,是目前国际电工委员会推荐的局部放电测试的通用方法之一,下面作详细介绍。

图3-13所示为目前国际上推荐的三种测量局部放电的基本回路,它们都是要将一定电压作用下的被试品 $C_X$ 中产生的局部放电电流脉冲传递到检测阻抗 $Z_m$ 的两端,然后把 $Z_m$ 上的电压[图3-13(a)、(b)]或 $Z_m$ 及 $Z_m$ 上的电压差[图3-13(c)]加以放大后送至仪器M进行测量。图中 $C_X$ 为被试品。 $C_K$ 为耦合电容,它为被试品 $C_X$ 与检测阻抗 $Z_m$ 之间提供一条低阻抗通路,当 $C_X$ 发生局部放电时,脉冲信号立即顺利耦合到 $Z_m$ 上去;同时对电源的工

频电压起隔离作用,从而大大降低作用于  $Z_m$  上的工频电压分量;为真正检测到  $C_x$  产生的局部放电,要求  $C_K$  内部不能有局部放电。 $Z$  为低通滤波器,它可以让工频高电压作用到被试品上去,但又阻止高压电源中的高频分量对测试回路产生干扰,也防止局部放电脉冲分流到电源中去。一般希望  $C_K$  不小于  $C_x$  以增大检测阻抗上的信号;同时  $Z$  应比  $Z_m$  大,使得  $C_x$  中发生局部放电时,  $C_x$  与  $C_K$  之间能较快地转换电荷,而从电源重新补充电荷的过程减慢,以提高测量的准确度。

图 3-13 (a) 中被试品与检测阻抗并联,称为并联法,这种接线适合于被试品一端接地的情况,它的优点是流过  $C_x$  的工频电流不流过  $Z_m$ ,在  $C_x$  较大的场合,这一优点尤为重要;图 3-13 (b) 中被试品与检测阻抗串联,称为串联法,适合于被试品两端都不接地的情况,不适用于现场试验。并联法和串联法均属于直接法,其缺点是抗干扰能力较差。为了提高抗干扰能力,可以采用图 3-13 (c) 所示的桥式测量回路(又称平衡测量回路),属于平衡法。此时被试品  $C_x$  和耦合电容  $C_K$  的低压端均对地绝缘,检测阻抗  $Z_m$  及  $Z'_m$  分别接在  $C_x$  和  $C_K$  的低压端与地之间。此时测量仪器  $M$  测得的是  $Z_m$  及  $Z'_m$  上的电压差。与直接法相比,平衡法抗干扰能力好,因为外部干扰源在  $Z_m$  和  $Z'_m$  上产生的干扰信号基本上相互抵消,而在  $C_x$  发生局部放电时,放电脉冲在  $Z_m$  和  $Z'_m$  上产生的信号却是相互叠加的。

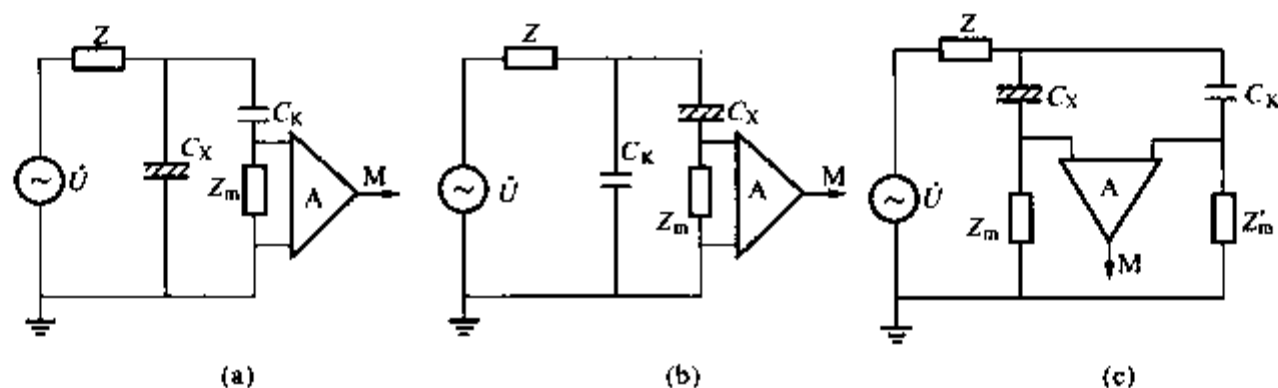


图 3-13 测量局部放电的基本回路

(a)、(b) 直接法; (c) 平衡法

### 三、测量时的注意事项

电磁干扰将严重地影响局部放电测量,如不加以抑制,则可能得到错误的结论。一般可将干扰分为内部干扰和外部干扰两类。由高压试验回路本身引起的干扰称为内部干扰,如回路中某元件或高压引线发生电晕放电时引起的干扰;来源于高压试验回路以外的干扰称为外部干扰,如无线电在测量装置放大器上产生的固有噪声、来自供电网络的高频电流等。为避免干扰,可采取如下措施。

- (1) 选用没有内部放电的试验变压器和耦合电容器,外露电极应有合适的屏蔽罩。
- (2) 选用抗干扰能力强的测量回路,如平衡法测量回路。
- (3) 对测量线路进行屏蔽,有条件时可将整个试验回路置于屏蔽室内进行测量。
- (4) 试验电源最好采用独立电源,这样可避免来自电网的干扰。
- (5) 提高高压试验回路中各元件的起晕电压,如加大高压引线的直径,将尖角整平等。
- (6) 将高压试验变压器、检测回路和测量仪器三者的地线连成一体,并采用一根地线相连。
- (7) 合理选择放大电路的频带或调谐放大电路的谐振频率。
- (8) 测量回路与被试品的连线应尽可能缩短,试验回路应尽可能紧凑,被试品周围的物

体应良好接地。

#### 四、测量结果的分析判断

局部放电测试能检测出绝缘中存在的局部缺陷。当局部放电的强度比较小时，说明绝缘中的缺陷不太严重，局部放电的强度比较大时，则说明缺陷已扩大到一定程度，而且局部放电对绝缘的破坏作用加剧。

试验规程规定了某些设备在规定电压下的允许视在放电量，可将测量结果与规定值进行比较。如规程中没有给出规定值，则应在实践中积累数据，以获取判断标准。

### 第五节 绝缘油试验

在充油的高压电气设备中，如变压器、互感器、断路器等，绝缘油起着绝缘、冷却和灭弧的作用。用油浸渍的纤维性固体绝缘，能有效地防止潮气的直接进入并填充了固体绝缘中的空隙，显著地加强了绝缘强度。在采用油纸绝缘结构的设备中，通过对绝缘油的各种分析试验，除了可以监测绝缘油的性能指标外，还可以有效地了解设备内部的状态及其发展趋势。

#### 一、绝缘油的检验

绝缘油的检验，一般分为三个阶段，即对新油、投运前的油（含注入设备前后的油）和运行中油的检验。不同阶段的油质检验有不同的试验项目和标准要求，如投运前的油质验收检测项目只限于油的微水、耐压、介损、含气量和色谱分析，一般进行一次即可，个别项目如色谱分析在耐压及局部放电试验前后各进行一次，以比较判断设备在高电压试验中是否发生异常。而设备投运后，在初期油质检验是随着设备运行天数的递增，逐步延长检测周期，在规定的各个周期内若无异常，再转为定期检测，如油中气体的气相色谱分析，对 220kV 变压器，一般规定投运后第 1、4、10、30 天进行色谱分析，如无异常再延长至正常的 3 个月一次的检测周期，它对及时发现投运初期时的设备异常、防止故障发生及发展有重要意义。在设备运行后，由于绝缘油受到氧气、湿度、高温、紫外线以及电场等因素的作用，其物理、化学性质和电气性能会逐渐变坏，因此还必须定期对油进行分析检验。

绝缘油的检验项目主要包括电气性能试验（击穿电压和介质损耗因数或电阻率）、杂质含量分析（如微量水等）、油中溶解气体的色谱分析（氢气、甲烷等）以及物理化学性能分析（凝点、闪点、水溶性酸 pH 值等）。此外，近几年利用液相色谱仪分析油中糠醛含量技术得到了快速发展和推广，绝缘油中的糠醛并不来自油本身，而是来自设备中的固体绝缘材料——绝缘纸，绝缘纸老化分解出呋喃甲醛（俗称糠醛）溶入油中，通过检测油中糠醛含量，可以较准确地对绝缘纸的老化程度作出判断。

下面主要介绍电气性能试验和油中溶解气体的色谱分析。

#### 二、绝缘油电气性能试验

##### 1. 电气性能试验的意义

绝缘油经常进行的电气性能试验主要有两项，即电气强度试验和介质损耗因数试验。影响绝缘油电气强度的主要因素是油中的水分和杂质。尤其是后者，当它与高含量的溶解水结合时，对耐压水平的降低十分显著。因此，电气强度不合格的绝缘油不准注入电气设备。

油的介质损耗因数即  $\tan\delta$  值能够反映油质受到污染或老化，对油中可溶性的极性物质、

轻微污染、老化产物或中性胶质以及微量的金属化合物极为灵敏。这是因为电介质在交变电场作用下,因电导、松弛极化和电离要产生能量损耗,当含有较多的杂质时,这些杂质的离子都是油的电导和松弛极化的主要载流子,必然会使该油的  $\tan\delta$  值增大。绝缘油老化后,生成的极性基和极性物质,同样也使油的电导和松弛极化加剧。因此,测定绝缘油的  $\tan\delta$  值,不论是用于检测新油的轻微污染还是用于检测运行油老化和污染都是十分有意义的。

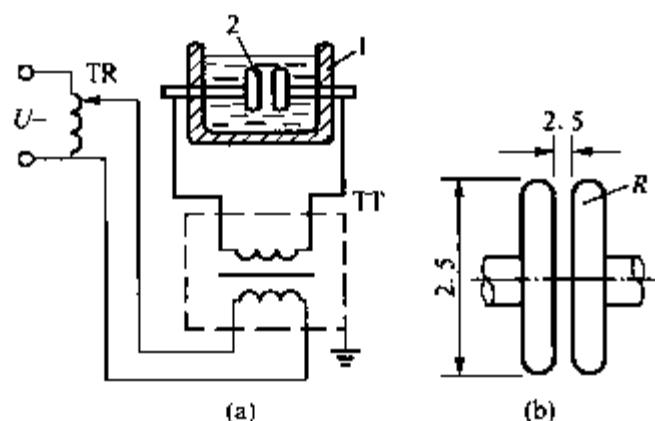


图 3-14 油击穿强度试验接线及电极尺寸

(a) 油击穿强度试验接线; (b) 油  
击穿强度试验电极尺寸

1—油杯; 2—电极

## 2. 电气强度 (击穿电压) 试验

(1) 试验方法概述。电气强度试验是基于测量在油杯中绝缘油的瞬时击穿电压值。试验的接线如图 3-14 (a) 所示,绝缘油中放入一定形状的标准试验电极 (标准电极主要有平板电极、球形电极和球盖形电极,图中为平板电极,由于平板电极对水分含量的反应不如球形电极敏感,所以现在普遍使用球形电极),在电极间施加工频电压,按一定的速度升压,直至电极间的油隙击穿。该电压即为绝缘油的击穿电压 (kV) 或换算为击穿强度 (kV/cm)。

(2) 试验注意事项。油样应在不破坏原密封状态下在试验室中放置一定时间,使油样接近环境温度。

在倒油前应使油混匀并尽量避免产生气泡,然后用油样将油杯和电极冲洗 2~3 次,将油样沿杯壁徐徐注入油杯,盖上杯罩,静置 10min。试验时零起升压,速度约 3kV/s (另一些方法规定为 2kV/s),直至油隙击穿,记录击穿电压值。这样重复 5 次 (另一些方法规定重复 6 次) 取平均值为测定值。为了减少油击穿后产生碳粒,应将击穿时的电流限制在 5mA 左右。在每次击穿后应对电极间的油进行充分搅拌,并静置 5min 后再试验。

(3) 介质损耗因数 ( $\tan\delta$  值) 的测量。测量绝缘油的介质损耗因数 ( $\tan\delta$  值),首先取油样后,将油倒入专用油杯中,利用高压西林电桥在工频电压下进行测量。由于合格的绝缘油  $\tan\delta$  值很小,所以应使用精度较高的西林电桥,以确保至少能测出 0.01% 的  $\tan\delta$  值。

绝缘油的  $\tan\delta$  值是随温度的升高而按指数规律剧增的。因此,除了在常温下测量油的  $\tan\delta$  值外,还必须测量油样高温下的  $\tan\delta$  值,如变压器油升温至 90℃,电缆油升温到 100℃。这是因为在低温下,合格油与不合格油的测量值有时差别不大,所以判断油质的好坏应以高温下测得的  $\tan\delta$  值为准,同时由于合格油的  $\tan\delta$  值随温度升高增长的较慢,而不合格油的  $\tan\delta$  值却随着温度升高增长的较快,这种差别,使我们更易于区分油质的好坏。

(4) 用绝缘油的电阻率代替  $\tan\delta$ 。由于绝缘油的介质损耗通常主要是由电导损耗所决定,所以绝缘油的电导 (相应的绝缘电阻) 也直接反映了它的  $\tan\delta$  值。因此,有时可以用测量绝缘油的电阻率来代替  $\tan\delta$  值的测量。测定油的电阻率采用专用的电阻率测定仪。电阻率仪所需的油样量更少,并可同时测定多个油样。

## 三、油中溶解气体的气相色谱分析

多年的实践证明,利用气相色谱分析仪对绝缘油中溶解气体的组分及其含量进行分析测试,可有效判断变压器和其他充油电气设备内部的潜伏性故障,并且可以在设备运行中不停电取油样,是目前变压器油常规试验中使用最频繁也是最有效的一个试验方法。

1. 充油设备内部故障产生的气体

在新绝缘油中溶解的气体，通常含有约 70% 的  $N_2$ 、30% 的  $O_2$  以及 0.3% 左右的  $CO_2$  气体，一般不含有  $C_1$ 、 $C_2$  之类的低分子烃（主要指甲烷、乙烷、乙烯和乙炔，合称总烃）。但是由于一些油处理设备的加热系统存在的死角，有时可能出现微量的乙烯甚至极微量的乙炔。

设备正常运行时，在电磁场、温度、水分等因素的作用下，绝缘油和绝缘材料会发生缓慢的分解和氧化，产生少量  $CO_2$ 、 $CO$  和微量的低分子烃，但其数量与故障产生的气体量相比要少得多。当设备内部出现故障时，主要是过热性故障（电流效应）和放电性故障（电压效应），绝缘油和固体绝缘材料裂解的速度大大加快，油中的  $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2$  和低分子烃类的气体含量显著地增加。在故障初期，通过分析油中溶解的这些气体，就能及早确定设备的内部故障。

2. 特征气体

在故障情况下并不是所有的各种气体成分都同时增长，而是有的气体不增加，或不明显地增加，与故障性质密切相关的气体则显著地增加，这取决于故障的性质和类型。油中各种溶解气体对应的故障性质见表 3 - 1。常把与故障性质密切相关的那些气体组分称为特征气体，如乙炔、乙烯、甲烷和一氧化碳等气体。当油中某些气体的含量达到一定浓度时，根据相关气体的比值情况，就可判断设备内部是否存在故障和故障的性质及类型。

表 3 - 1 根据油中气体含量判断设备内部故障

被 分 析 的 气 体		分 析 目 的
推荐检测的气体	$O_2$	了解脱气程度和密封（或漏气）情况，严重过热时 $O_2$ 也会因极度消耗而明显地减少
	$N_2$	在进行 $N_2$ 测定时，可了解 $N_2$ 饱和程度，与 $O_2$ 的比值可更准确地分析 $O_2$ 的消耗情况。在正常情况下， $N_2$ 、 $O_2$ 和 $CO_2$ 之和还可估算出油的总含气量
必测的气体	$H_2$	与甲烷之比可判别并了解过热温度，或了解是否有局部放电情况和受潮情况
	$CH_4$	了解过热故障的热点温度情况
	$C_2H_6$	
	$C_2H_4$	
	$C_2H_2$	了解有无放电现象或存在极高的热点温度
	$CO$	了解固体绝缘的老化情况或内部平均温度是否过高
	$CO_2$	与 $CO$ 结合，有时可了解固体绝缘有无热分解

3. 油中溶解气体色谱分析方法简介

(1) 脱气。对油中溶解气体进行分析，首先需要把溶于油中的气体分离出来。目前普遍使用的脱气方法是机械振荡法，它是利用油中气体在油气两相之间重建平衡的原理所建立起来的溶解平衡法。这种脱气方法能把误差降低到 5% 左右，提高了测试结果的准确性和可比性，其重复性和再现性能满足要求。不足之处是在平衡后的气体中所得到的气体浓度（烯和炔）大约为油中原有浓度的 1/2 左右。

(2) 气相色谱仪。从油中脱出的混合气体，要送入气相色谱仪中才能进行分析和检测。气相色谱仪主要由气路系统、电气系统以及调节测量系统和温控系统组成，色谱流程如表 3 - 2 所示，它是以气体如氮气为载气（流动相，因为是气体所以称为气相）的，主要用来分析低分子化合物。其中最关键的两个部件是色谱柱和鉴定器：色谱柱能把混合气体彼此分离

并使同种气体浓缩——混合气体注入色谱仪进样口后，在载气的带动下，从一端进入色谱柱并沿着管道通过其中的吸附剂（固定相）而逐渐向前移动，由于吸附剂对混合气体中每种气体的吸附作用大小不同，吸附作用小的气体组分移动得快些，而吸附作用大的气体组分移动速度就慢，这样不同气体组分的流动速率逐渐产生了差异，经过如此反复作用，不同的气体

最终被完全地分离开，而相同的气体则汇集在一起被浓缩了，并按相对固定的顺序先后流出色谱柱；鉴定器是把从色谱柱依次流出的气体所产生的非电量信号定量地转变成电信号的重要计量元件——当前使用的气相色谱仪一般是双柱双鉴定器的多气路系统，一个鉴定器是“热导检测器”，用于测定组分中的  $H_2$ 、 $O_2$ ；另一个鉴定器是“氢火焰离子化检测器”，用于测定  $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$  和转化成  $CH_4$  形式的  $CO_2$ 、 $CO$  的含量。色谱仪的灵敏度和最小检测浓度主要取决于所用的鉴定器。非电量信号经鉴定器转变成电信号后，由记录仪记录下来，形成色谱图，如图 3-15 所示。它是一个有序的脉冲峰图，一个脉冲峰代表了一个气体组分，而峰高或峰面积则反映了该气体的浓度，所以

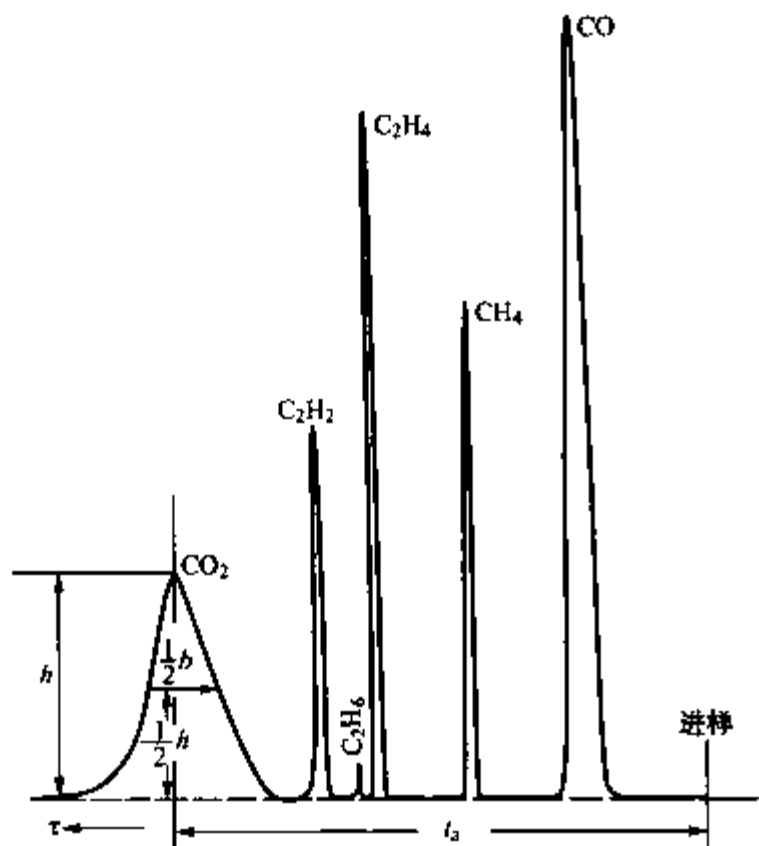


图 3-15 典型色谱图

通过色谱图既可对被测的气体定性也可对其定量分析。

表 3-2

色 谱 流 程

序 号	流 程 图	说 明
1		1. 分两次进样 进样 I (FID) 测烃类气体； 进样 II (FID) 测 $CO$ 、 $CO_2$ ； (TCD) 测 $H_2$ 、 $O_2$ ( $N_2$ )。 2. 此流程适合于一般仪器
2		1. 一次进样，自动切换阀切换操作切换阀在实线位置时； (TCD) 测 $H_2$ 、 $O_2$ ( $N_2$ )； (FID) 测 $CH_3$ 、 $CO$ ； 切换阀在虚线位置时； (FID) 测 $CO_2$ 、 $C_2-C_3$ 。 2. 此流程适合于自动分析仪器

注 Ni—镍触媒转化器，V--自动切换阀。

#### 4. 故障判断

(1) 特征气体法。每次色谱分析后提供的测定值至少有 7 种气体组分，在进行故障的分

析判断时，首先要注意的是那些能反映故障性质的特征气体的含量和变化，不同故障所对应的特征气体见表 3-3。

表 3-3 不同故障产生的气体

故 障 类 型	主 要 气 体 组 分	次 要 气 体 组 分
油过热	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油和纸过热	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油纸绝缘中局部放电	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO <sub>2</sub>
油中火花放电	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
油中电弧	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油和纸中电弧	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>

注 进水受潮或油中气泡可能使氢气含量升高。

(2) 油中溶解气体的注意值和产气率。当特征气体明显增加时，应与标准规定的注意值进行比较。各种气体的注意值不是划分设备有无故障的唯一标准，但当气体浓度达到注意值时，应缩短检测周期进行跟踪分析，查明原因消除缺陷。事实表明，超过注意值的绝大多数设备内部都存在着不同程度的故障。因此，油中溶解气体超过注意值时应引起足够的重视。各种充油电气设备油中气体含量的注意值见表 3-4。

表 3-4 各种充油电气设备油中气体含量的注意值

设 备	气 体 组 分	含 量 μL (气) / L (油)	
		220kV 及以上	110kV 及以下
变压器和电抗器	总烃	150	150
	乙炔	1	5
	氢	150	150
	一氧化碳	当 CO>300 时，相对产气>10%	
	二氧化碳	可与 CO 结合计算 CO <sub>2</sub> /CO 的比值作参考	
电流互感器	总烃	100	100
	乙炔	1	2
	氢	150	150
电压互感器	总烃	100	100
	乙炔	2	3
	氢	150	150
套管	甲烷	100	100
	乙炔	1	2
	氢	500	500

注 该表所列数据不适用于从气体继电器采集的气体。

要对设备故障的严重性做出正确的判断，不能仅根据分析结果的绝对值，必须考虑故障

的发展趋势，进行产气率的计算。产气率有两种表示方法——绝对产气率和相对产气率。绝对产气率是指每运行日产生某种气体的平均值；相对产气率是指每运行月（或折算到月）某种气体含量增加原有值的百分数的平均值，一般来说总烃的相对产气率大于 10% 时，应引起注意，但对总烃起始含量很低的设备不宜采用此判据。

产气率在很大程度上依赖于设备类型、负荷情况等因素，应结合这些情况进行综合分析。

(3) 故障性质和故障类型的判断—三比值法。

1) 不同故障类型的气体组合。当油中溶解气体中的总烃、乙炔和氢气三项中有一项测定值和产气率超过注意值时，应对几种气体的组合特征进行判断或按相关气体的比值进行判断，以了解故障的性质、类型。不同故障类型所形成的气体组合特征见表 3-5。

表 3-5 不同故障类型的气体组合特征

序号	故障类型	气体的组合特征
1	裸金属过热	总烃高，CO、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 均在正常范围
2	金属过热并涉及固体绝缘	总烃高，开放式变压器 CO>300μL/L，乙炔在正常范围
3	固体绝缘过热	总烃在 100μL/L 左右，开放式变压器的 CO>300μL/L
4	金属过热并有放电	总烃高，C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> >5μL/L，H <sub>2</sub> 含量较高
5	火花放电	总烃不高、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> >10μL/L、H <sub>2</sub> 含量较高
6	电弧放电 <sup>①</sup>	总烃高，乙炔含量高并成为总烃的主要成分，H <sub>2</sub> 含量也高
7	H <sub>2</sub> 含量>100μL/L 而其他指标均为正常，有多种原因应具体分析	

① 在电弧放电故障中，若 CO、CO<sub>2</sub> 含量也高，则可能放电故障已涉及到固体绝缘；但在突发性的电性故障中，有时 CO、CO<sub>2</sub> 含量并不一定高，应结合气体继电器的气样分析后作出判断。

由表 3-5 不难看出，通过故障气体的组合特征虽然能对产生的故障性质和类型做出推断，但对介于两种类型之间的故障则不易把握。因此，还需要考察它们在数量上的比例关系。这种判断方法就是三比值法。

2) 三比值法。三比值法是在热动力学和实践的基础上，用五种气体的三对比值以不同的编码表示作为判断充油电气设备故障类型的方法，编码规则和故障类型的判别方法见表 3-6 和表 3-7。

表 3-6 编码规则

气体比值 范围	比值范围的编码			气体比值 范围	比值范围的编码		
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
<0.1	0	1	0	≥1~<3	1	2	1
≥0.1~<1	1	0	0	≥3	2	2	2

表 3-7 故障类型诊断方法

编 码 组 合			故障类型判断	故障实例（供参考）
$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$		
0	0	1	低温过热 $<150^{\circ}C$	绝缘导线过热，注意 $CO_2$ 和 $CO$ 含量和 $CO_2/CO$ 值
	2	0	低温过热（ $150\sim 300^{\circ}C$ ）	分接开关接触不良，引线夹件螺丝松动或接头焊接不良，涡流引起的铜过热，铁芯漏磁，局部短路，层间绝缘不良，铁芯多点接地等
	2	1	中温过热（ $300\sim 700^{\circ}C$ ）	
	0, 1, 2	2	高温过热（ $>700^{\circ}C$ ）	
	1	0	局部放电	高湿度、高含气量引起油中低能量密度的局部放电 <sup>①</sup>
2	0, 1	0, 1, 2	低能放电	引线对电位未固定的部件之间连续火花放电，分接抽头引线和油隙闪络，不同电位之间的油中火花放电或悬浮电位之间的火花放电
	2	0, 1, 2	低能放电兼过热	
1	0, 1	0, 1, 2	电弧放电	绕组匝间、层间短路、相间闪络，分接头引线间油隙闪络，引线对箱壳放电、绕组熔断、分接开关飞弧、因环路电流引起电弧，引线对其他接地体放电等
	2	0, 1, 2	电弧放电兼过热	

① 编码组合为“010”时，也可能是由于油中进水与铁反应而产生了高含量的氢。这时应检测油中的含水量。

3) 对一氧化碳和二氧化碳的判断。当故障涉及到固体绝缘时，会引起  $CO$  和  $CO_2$  含量的明显增长。根据现有的统计资料，固体绝缘的正常老化过程与故障情况下的劣化分解，表现在油中  $CO$  和  $CO_2$  的含量上，一般没有严格的界限，规律也不明显。这主要是由于从空气中吸收的  $CO_2$ 、固体绝缘老化及油的长期氧化形成  $CO$  和  $CO_2$  的基值过高造成的。开放式变压器溶解空气的饱和量为 10%，设备里可以含有来自空气的  $300\mu L/L$  的  $CO_2$ 。在密封设备里，空气也可能经泄漏而进入设备油中，这样，油中的  $CO_2$  浓度将以空气的比率存在。经验证明，当怀疑设备固体绝缘材料老化时，一般  $CO_2/CO>7$ ，当怀疑故障涉及到固体绝缘材料时（高于  $200^{\circ}C$ ），可能  $CO_2/CO<3$ ，必要时，应从最后一次的测试结果中减去上一次的测试数据，重新计算比值，以确定故障是否涉及到了固体绝缘。

#### 5. 色谱分析判断中的注意事项

(1) 检修时带油电焊的设备应在电焊前后均取样进行色谱分析，以便查证，防止造成误判断。

(2) 检修时在变压器内使用过 1211 灭火剂或曾使用其他卤化物时，应作好记录。

(3) 注意气体的其他来源。如氢气，油中的水与铁作用会产生氢，不锈钢元件可能释放吸附的氢，设备中的某些漆类也可能产生氢气，在分析判断时均应估计到。此外，还应考虑有载调压器的切换开关油箱向变压器主油箱的渗漏，以及强油循环的变压器因潜油泵电动机引起的气体含量异常等情况。

(4) 在特征气体的含量正常时，有时因空气的漏入或呼吸通道堵塞而引起气体继电器动

作, 应检查  $O_2$  含量的变化并作具体分析。

## 第六节 耐 压 试 验

耐压试验是一种确认电气设备绝缘可靠性的试验, 所施加的电压比工作电压高得多, 在试验过程中有可能引起设备绝缘的损坏, 所以又称破坏性试验。耐压试验一般都放在非破坏性试验项目合格之后进行, 以避免或减少不必要的损失。根据所施加的电压的类型不同, 耐压试验可分为交流 (含工频及倍频) 耐压、直流耐压、雷电冲击耐压和操作冲击耐压四种。

### 一、交流耐压试验

工频交流耐压试验是检验电气设备绝缘强度的最有效和最直接的方法, 能有效地发现绝缘中危险的集中性缺陷, 也有可能促使有机绝缘中的一些弱点进一步发展而造成残留性损伤。在许多场合中工频交流耐压试验还可用来等效地检验绝缘对操作过电压和雷电过电压的耐受能力。

我国有关国家标准以及部颁《电力设备预防性试验规程》中对各类电气设备的耐压值都作了具体的规定。按国家标准规定, 进行工频交流耐压试验时, 在绝缘上施加工频试验电压后, 要求持续 1min, 这个时间规定一是为了保证全面观察被试品的情况, 使绝缘中危险的缺陷来得及暴露出来, 同时也是为了不致于因时间太长而引起不应有的绝缘损伤, 甚至使本来合格的绝缘产生热击穿。运行经验表明, 凡经受得住 1min 工频耐压试验的电气设备, 一般都能保证安全运行。

倍频感应耐压试验主要是针对变压器类绝缘的, 是指在被试品低压绕组上施加倍频电压 (电压值为额定电压的 2 倍), 在高压绕组和中压绕组 (如果有的话) 上由于感应而产生同样倍数的高压进行试验。感应耐压试验时, 各绕组上的电压分布与运行中的分布接近, 不仅考验了绕组的主绝缘, 也考验了绕组的纵绝缘。这项试验弥补了工频条件下试验电压为额定电压 2 倍时, 被试品铁心严重饱和, 励磁电流严重增大的问题。当试验所采用的频率超过 100Hz 时, 为了避免频率的提高加重对绝缘的负担, 应缩短试验的时间, 耐压时间可由下式计算

$$t = 60 \times \frac{100}{f} \quad (s) \quad (3-18)$$

式中,  $f$  为电压的频率, 单位为 Hz。

### 二、直流耐压试验

直流耐压试验是直流电气设备的基本耐压方式。对大电容量的交流电气设备, 在现场进行交流耐压试验时由于所需试验设备容量较大, 往往难以满足, 因而改为进行直流耐压试验。与交流耐压试验相比, 直流耐压试验有以下特点: 试验设备轻小; 在绝缘进行直流耐压试验的同时, 可通过测量泄漏电流来观察绝缘内部的集中性缺陷; 其对有机绝缘的损伤程度比交流耐压时小; 能发现交流耐压不易发现的电机端部的绝缘缺陷; 但由于直流电压作用下绝缘内部的电压分布和交流电压作用下的电压分布不同, 其对绝缘的考验不如交流下接近实际和准确。

### 三、冲击耐压试验

电力系统中的高压电气设备, 除了承受长期工作电压的作用外, 在运行过程中还可能会承受短时雷电过电压和操作过电压的作用。冲击耐压试验就是用来检验高压电气设备对雷电

过电压和操作过电压的耐受能力。由于冲击耐压试验对试验设备和测试仪器的要求高、投资大,测试技术也较复杂,冲击后会对绝缘造成累积效应,所以只在制造厂的形式试验或出厂试验中才进行本项试验,运行部门的预防性试验中一般不做,而是用等值工频耐压试验来代替。对超高压设备而言,普遍认为不能以工频耐压试验替代操作冲击耐压试验,故对超高压设备应进行操作冲击耐压试验。

电气设备内绝缘的雷电冲击耐压试验采用三次冲击法,即对被试品施加三次正极性和三次负极性雷电冲击试验电压( $1.2/50\mu\text{s}$ )。对变压器和电抗器类设备的内绝缘,还要再进行雷电冲击截波 $[1.2/(2\sim5)\mu\text{s}]$ 耐压试验,它对绕组绝缘(特别是其纵绝缘)的考验往往比雷电冲击全波试验更加严格。

在进行内绝缘冲击全波耐压试验时,应在被试品两端并联一球隙,以防止冲击电压发生器调波过程中可能出现的冲击高电压对被试品造成不必要的损伤。球隙的放电电压一般整定得比试验电压高 $5\%\sim 10\%$ ,对变压器和电抗器类被试品高 $15\%\sim 20\%$ 。

电力系统外绝缘的冲击高压试验通常可采用15次冲击法,即对被试品施加正、负极性冲击全波试验电压各15次,相邻两次冲击的时间间隔应大于1min。在每组15次冲击的试验中,如果击穿或闪络的闪数不超过2次,即可认为该外绝缘试验合格。

内、外绝缘的操作冲击耐压试验的方法与雷电冲击全波试验完全相同。

## 第七节 绝缘的在线监测

为了防止运行中的电力设备发生事故,应定期地进行绝缘预防性试验,这需要停电才能进行,且两次间隔时间较长,如大多数设备的预试周期为1~3年,不一定能及时发现绝缘缺陷。随着社会经济的发展,对电力系统运行的可靠性和经济性的要求越来越高,推动了当前电力设备的检修模式由“定期检修”向“状态检修”发展,因此对电力设备的绝缘状态进行在线监测和带电检测势在必行。对设备进行在线或带电监测,能实时或根据需要简便地监测各种电气绝缘参数,判断设备的绝缘状况,这对于保证电力设备的可靠运行及降低设备的运行费用都是很有意义的。随着计算机技术及电子技术的飞速发展,实现电力设备运行的自动监控及绝缘状况在线监测,并对电气设备实施状态监测和检修已成为可能。

由于种种原因使得某些技术问题未能得到彻底解决,在一定程度上影响在线监测技术的推广应用。这些技术问题有的是属于理论性的,例如在线监测和停电试验的等效性、测量方法的有效性、大气环境变化对监测结果的影响等;另一类则属于测量方法和系统设计方面的问题,例如通过传感器设计及数字信号处理技术来提高监测结果的可信度,采用现场总线控制等技术提高监测系统的抗干扰能力,简化安装调试及维修工作等。妥善解决这些问题将有助于提高在线监测系统的质量和技术水平。

### 一、在线监测系统

一般来说绝缘状态在线监测系统主要是针对35kV及以上电压等级变电所电气设备以及发电厂的大型发电机、电动机等。该系统可对发电机、电动机、变压器、互感器、耦合电容器、避雷器、套管、断路器等设备的绝缘状况实施在线检测和诊断。

绝缘的在线监测系统一般由三部分组成:信号抽取部分(传感器)、信号传输部分(电缆)和信号检测部分,按照信号处理方式及主机设备的设置分两类,如图3-16所示。一类

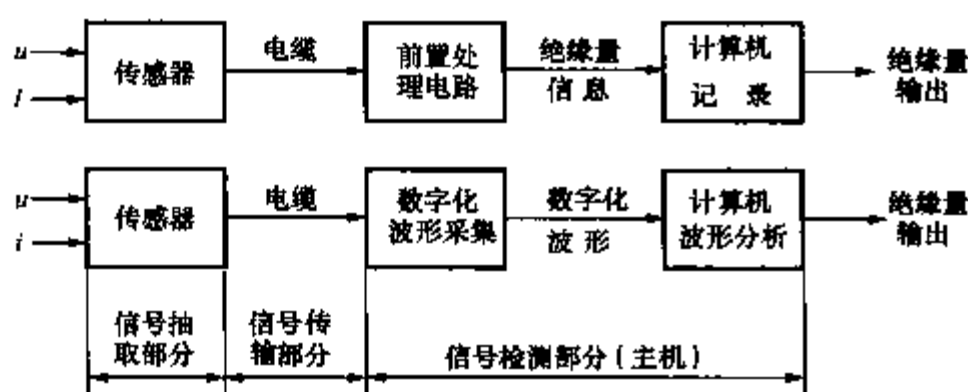


图 3-16 两种典型的绝缘在线监测系统

是对送来的各个电压、电流信号分别经各自的硬件电路处理后，送入计算机，这种方式由于硬件电路多，常因元件质量问题造成电路性能差，工作不稳定，降低了可靠性和可信度；另一类将接受到的电压电流信号转换成数字信号，再送入计算机存储后进行运算分析。

## 二、变压器在线监测

主要介绍变压器的局部放电在线监测和变压器油中溶解气体的在线监测。

### 1. 变压器局部放电在线监测

变压器绝缘在线检测最有效的方法之一是监测局部放电电脉冲参量。变压器局部放电的在线监测比停电测量会遇到更强的干扰，而且正常运行中局部放电量较小，即使出现有 5 000 pC 左右的放电也能运行，发展过程可能延续几周甚至几年。但当发展到绝缘击穿故障前期，它的放电量会大大超过正常，因此利用在线监测设备进行绝缘故障监测报警，再结合其他试验进行综合故障分析，就能有效地起到监测作用。

变压器局部放电在线监测的方法主要有以下几种。

(1) 差动平衡检测法。差动平衡检测法一般将传感器（检测脉冲电流）安装在变压器油箱接地线和高压套管末屏接地线上，原理图如图 3-17 所示。它的工作原理是比较两种信号，一种是内部的局部放电信号，在这两个接地线上产生

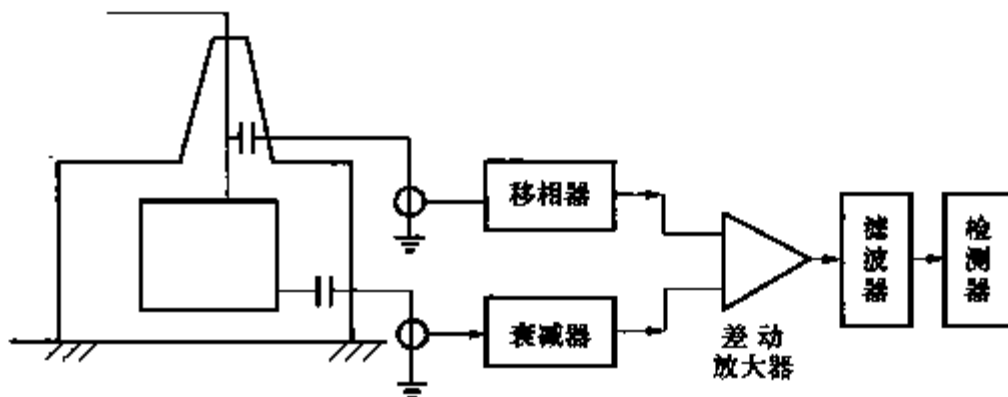


图 3-17 差动平衡检测法原理图

方向相反的电流脉冲；另一种是来自外部的干扰信号，在这两个接地线上产生方向相同的电流脉冲，经移相器和衰减器调整后，通过差动放大器对外部干扰信号加以抑制。这种接线方式结构简单，在任何情况下它不会影响变压器的正常运行。

(2) 脉冲极性鉴别法。同差动平衡检测法一样，使用的脉冲电流传感器同时从变压器油箱接地线上和高压套管末屏接地线上抽取电流脉冲信号，原理图如图 3-18 所示。

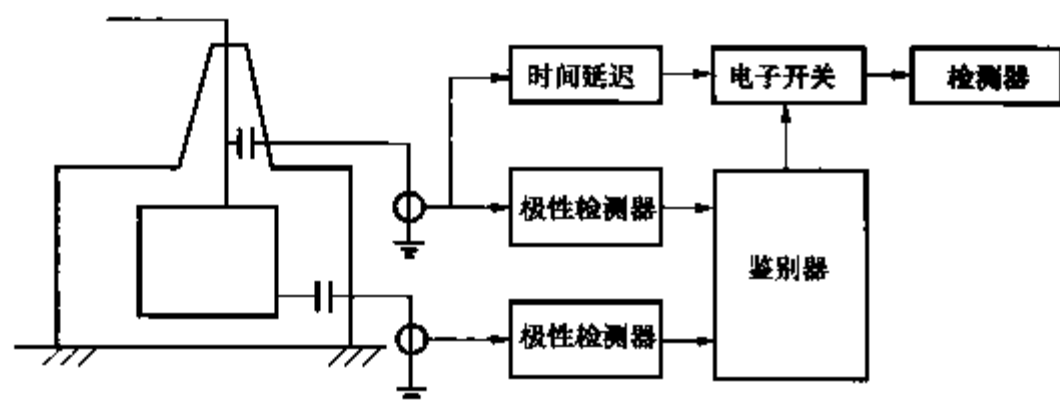


图 3-18 脉冲极性鉴别法的原理图

干扰信号在两个传感器上产生的脉冲电流信号的极性是一致的，在这种情况下，电子开关断开，无信号输出，干扰得以消除。当内部发生局部放电时，两个传感器上的脉冲极性相反，电子开关闭合，放电信号输出。它能有效地排除来

自高压线路的干扰，但对象高频通讯的重复性干扰，鉴别器的电子开关将持续处于开断状态，从而也无法检测局放信号。

(3) 超声波法。当变压器内部发生局部放电时，会产生超声波，超声信号向四周传播，到达变压器箱壁，通过在箱壁上安装压电超声传感器测量超声信号，就可以判断是否发生了局部放电。由于局部放电产生的超声信号的频谱与环境噪声、风扇噪声、铁心的磁噪声等有明显的差别，因而不会影响局部放电测量，此外还具有抗电磁干扰、可对放电点作空间定位的优点。不足之处是对局部放电量大小的确定，还没有一个有效的校正方法，并且灵敏度低。

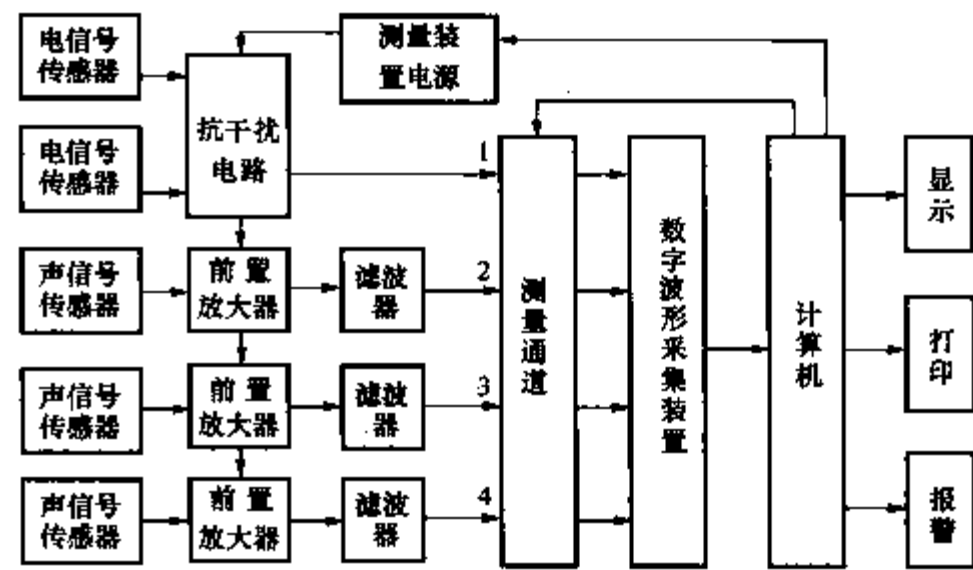


图 3-19 电气—超声联合检测法原理图

#### (4) 电气—超声联合检测法

其原理图如图 3-19 所示，它是用电流传感器从变压器油箱接地线上和高压套管末屏接地线上检测电信号，用安装在变压器箱壁上的几个超声波传感器检测局部放电产生的超声信号，由于声信号要比电信号延迟一个时间，根据这一时间就能确定传感器和放电点之间的距离，从而确定放电的位置。

#### 2. 变压器油中溶解气体在线监测

(1) 油中溶解性气体的现场脱气方法。要对变压器油中溶解气体进行分析，必须先将气体分离出来。在油中溶解气体的在线监测系统中，脱出气体的方法有两种：一种是利用某些合成材料薄膜（渗透膜）如聚四氟乙烯、氟硅橡胶等的透气性，让油中溶解气体经此膜而透析到气室里，但橡胶或塑料薄膜与变压器油长期接触后会发生老化，特别是安装在变压器油箱底部的半透性薄膜，它还要长期的承受很大的油压，需要经常维护；另一种是对取出的油样吹气，将溶于油中的气体替换出来，其示意图如图 3-20 所示。目前也有不需脱气的油中气体检测仪，将气敏传感器放在油中直接进行检测。

(2) 油中溶解气体的现场测量方法。将气体从油中分离出来后，对其定量检测的方法有两大类：一类是色谱柱，另一类是对某种或某几种气体敏感的传感器。图 3-21 是对氢气含量监测的原理示意图。

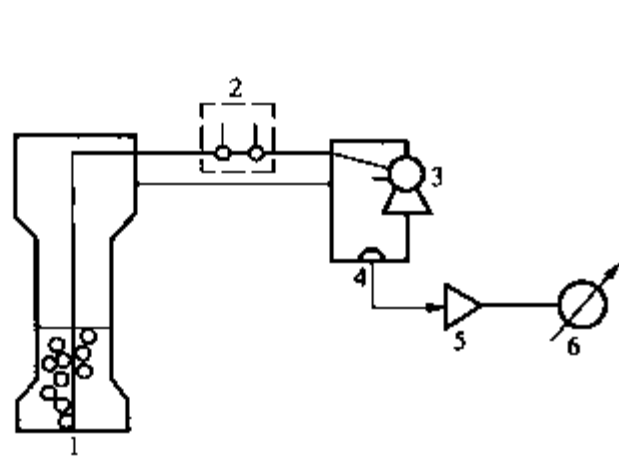


图 3-20 吹气法脱气及气敏元件检测示意图

1—脱气室；2—阀；3—泵；4—气敏元件；  
5—放大器；6—浓度指示器

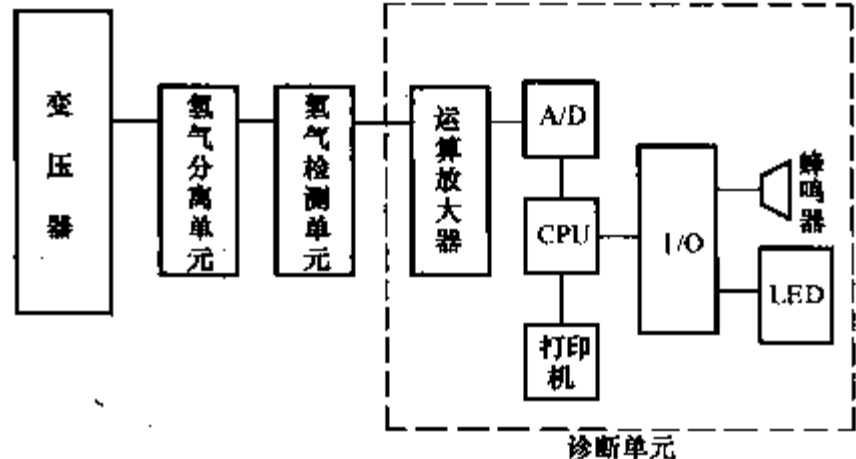


图 3-21 油中氢气含量的微机在线监测装置的实例

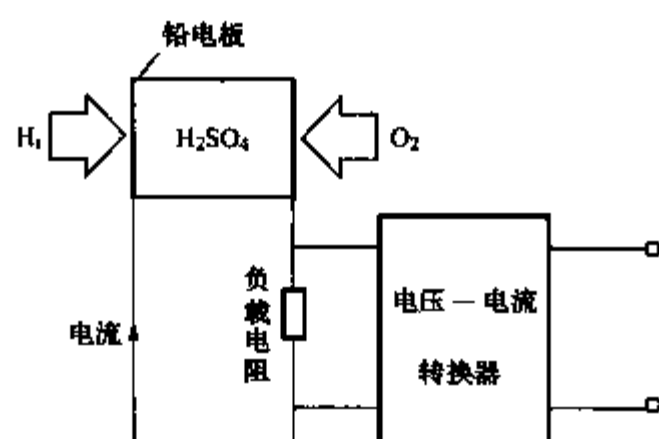
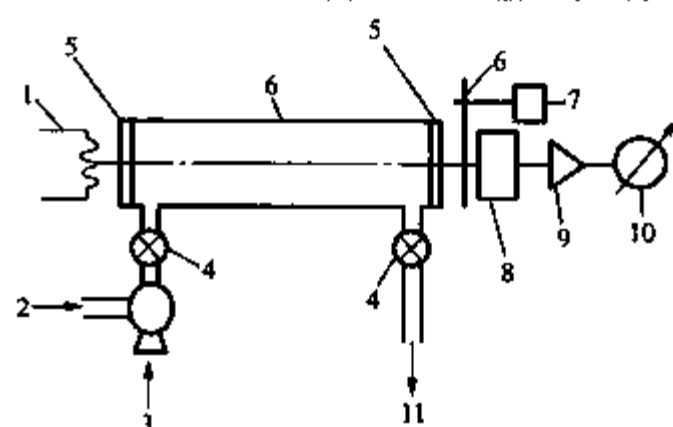


图 3-22 燃料电池氢气传感器的原理图

气体敏感传感器利用气敏元件将从油中析出的某类气体含量的多少转换成电信号的强弱，从而加以监测。以氢气检测为例，一般用燃料电池或半导体氢敏元件来实现对已脱出气体中的氢含量的在线监测。燃料电池是由电解液隔开的两个电极所组成的，图 3-22 为其原理图，由于电化学反应，氢气在一个电极上被氧化，而氧气则在另一电极上形成，所产生的电流正比于氢气的体积浓度 ( $\mu\text{L/L}$ )。

半导体氢敏元件也有多种。例如用以  $\text{SnO}_2$  为主体的烧结型半导体，当氢的含量增高时， $\text{SnO}_2$  层的电导增大，使传感器的输出随着氢含量的增大而近于线性下降。利用吸收光谱的原理制成的气体传感器是近几年发展起来的技术，具有选择性好的特点。图 3-23 所示为一种利用红外原理制作的  $\text{C}_2\text{H}_2$  传感器的原理示意图。 $\text{C}_2\text{H}_2$  在红外区里有其固有的吸收光谱，如将可允许此相应波长的光线能通过的干扰滤波器装于光源及接收侧，则根据热电检测器处所接收到的红外光的强度变化，即可测得气室中  $\text{C}_2\text{H}_2$  的含量。但有些气敏元件的长期稳定性还不够满意，以致可能漏报或虚报。也有些监测仪所采用的对某种气体敏感的元件，往往对其他气体也有一些敏感性，以致影响其使用。

图 3-23 红外法  $\text{C}_2\text{H}_2$  传感器的原理示意图

- 1—加热器；2—进气口；3—气泵；4—电磁阀；  
5—干扰滤波器；6—遮光器；7—电动机；  
8—热电检测器；9—放大器；10—仪表；  
11—出气口

采用色谱柱来分离气体，可以检测 3 种或 6 种气体，根据不同情况选用。图 3-24 为能分析 6 种气体的色谱仪的主要结构框图。

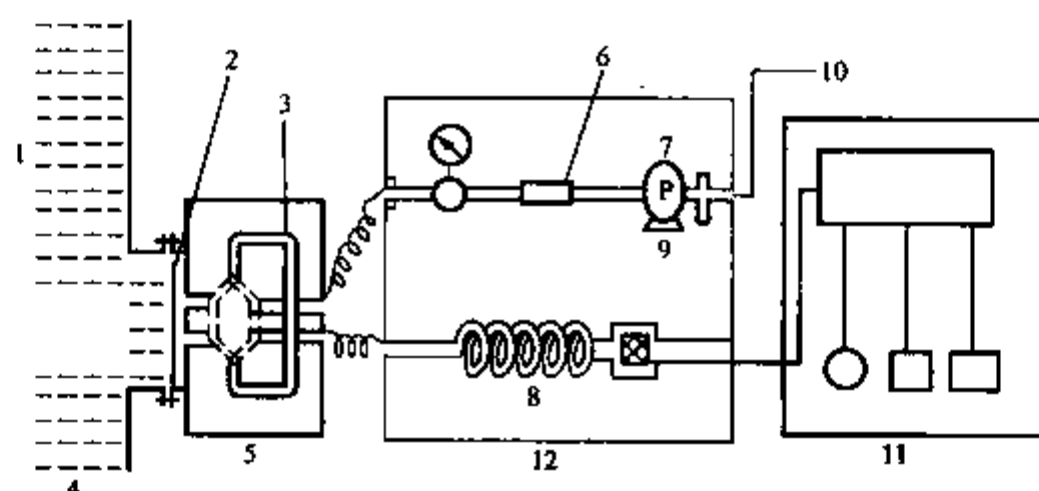


图 3-24 能分析 6 种气体的在线色谱仪主要结构框图

- 1—变压器油；2—塑料渗透膜；3—测量管道；4—变压器；5—分离气体单元；  
6—干燥管；7—泵；8—色谱柱；9—气敏元件；10—载气（空气）；  
11—诊断单元；12—检测单元

### 三、发电机的在线监测

发电机的绝缘材料在运行中易出现绝缘过热、泄漏增大、局部放电量较大等绝缘缺陷，

由于它是旋转机械,进行在线监测是比较复杂和困难的。目前,在线监测大部分采用局部放电测量、温度(局部过热)测量等。一般对发电机进行局部放电监测来判断绝缘状况,在运行电压下发电机局部放电量可达5 000—10 000pC。

运行中的发电机,如果由于绕组焊接不良或绝缘不良引起的放电、线圈端部由于污秽造成的放电及端部电晕放电,一般在几个月甚至几年后才会导致故障,但槽口的绝缘损伤或由水气等造成的表面放电会很快造成故障。故障性放电的幅值比正常状态的放电幅值高30倍以上。

通常发电机绝缘局部放电在线监测一般检测放电量幅值、每周期放电次数以及在一定时间内的放电量的增量。在实际运行中,发电机的局部放电在线监测曲线示例见图3-25。从图中曲线2上升陡度可见,有故障的设备局部放电幅值随时间而增长,并且绝对值较大,而经检修后则恢复正常。

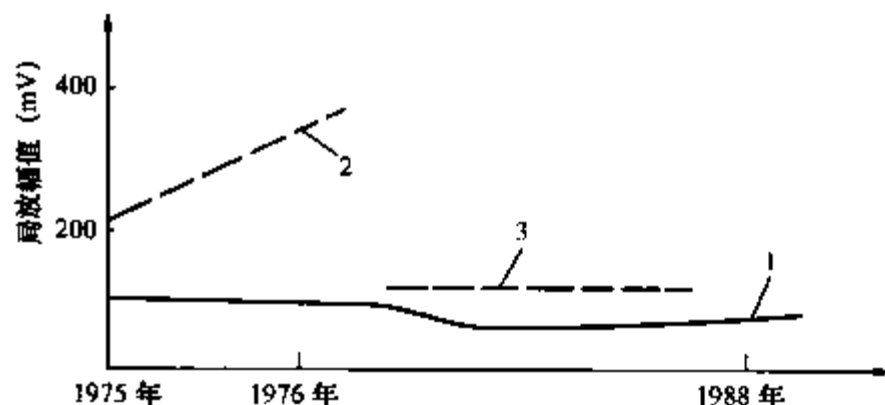


图3-25 发电机在线监测实测曲线示例  
1—正常运行发电机的测量曲线；2—有故障的曲线；  
3—检修后的测量数据

发电机局部放电在线监测系统采用高灵敏度固化传感器及抗干扰抑制单元,能有效地检测绝缘缺陷,其系统结构框图如图3-26所示。

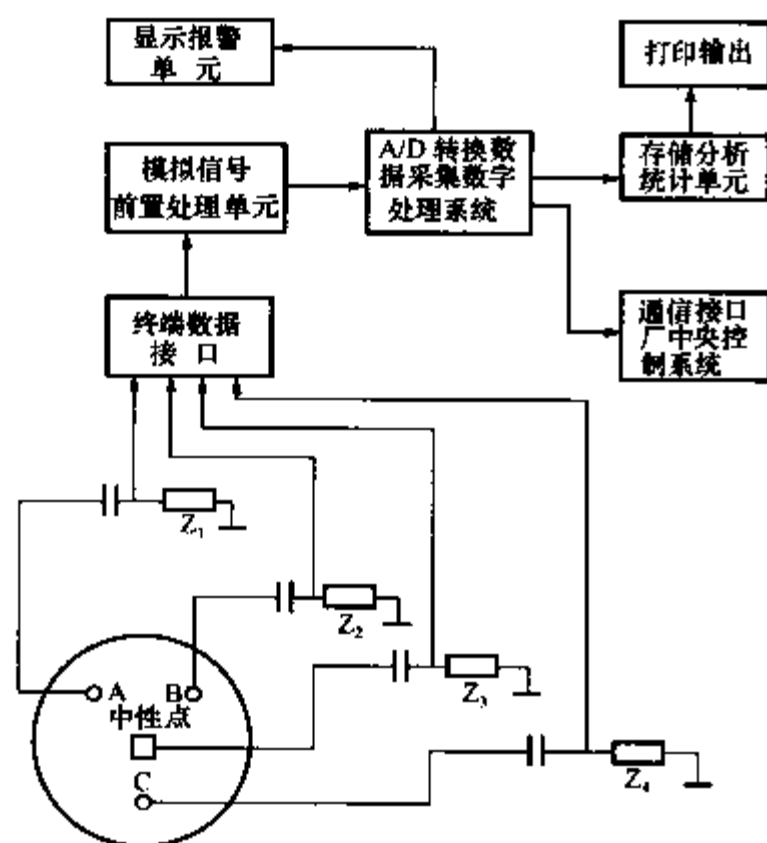


图3-26 系统结构框图

图中, $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $Z_4$ 为检测阻抗,测量中性点及发电机出线端的电流信号;终端数据接口单元可对多路信号进行通道切换控制、波形前置放大、整形及变换处理。数字信号处理系统则实现对经A/D变换后的数字信号进行智能化分析、判断,以及故障信号的存储及输出。显示报警单元是将数据处理单元输出的故障信号在线的数字或图像显示,同时语音系统也将进行语音报警。

#### 四、电容型设备在线监测

电容型设备包括电流互感器、电容式电压互感器、电容型套管、耦合电容器等。这类设备数量较多,且因其绝缘故障往往引起爆炸事故,严重影响电力系统的安全运行。因此,开展电容型设备在线监测,能提高设备运行可靠性,减少设备的检修停电时间。

对电容型设备在线监测主要检测其绝缘的介电特性,即介质损耗因数,是以测量在相电压下流过绝缘介质的电流为基础的。主要的方法有三种:①不平衡—补偿法,这种方法直接测量电流量,当绝缘有缺陷时,流经绝缘的电流会发生变化,缺点是灵敏度低;②电桥法,是以被测值与作为标准的已知值进行比较为基础的;③过零比较法以及数字波形法,通过直

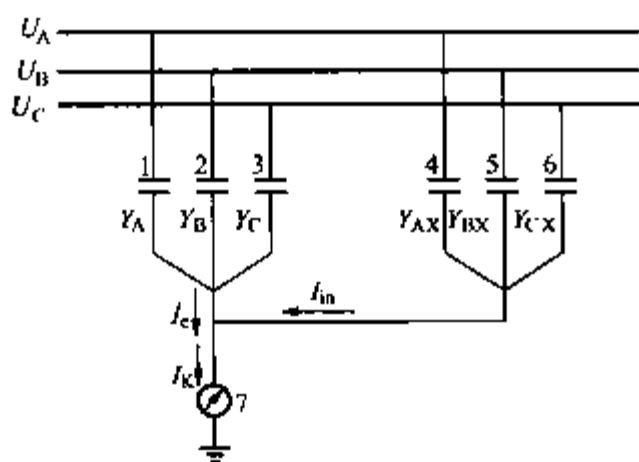


图 3-27 不平衡—补偿法原理图

接比较流经设备绝缘的电流信号和电压信号来检测绝缘状况。

### 1. 不平衡—补偿法

其原理示意图如图 3-27 所示。

图中, 1、2、3 为被测设备的电容, 4、5、6 为杂散电容, 会对测量产生干扰。\$Y\_B\$ 等表示其导纳, 7 为测量仪表。电流 \$I\_e\$ 为不平衡电流, 是由于三相设备的导纳有差别引起的, \$I\_{in}\$ 为干扰电流, 电流 \$I\_K\$ 为工频分量, 包括不平衡电流 \$I\_e\$ 和干扰电流 \$I\_{in}\$。设

备绝缘正常时, 根据图 3-44 可得

$$\begin{aligned} I_e &= (Y_0 + \Delta Y_A) \dot{U}_A + (Y_0 + \Delta Y_B) \dot{U}_B + (Y_0 + \Delta Y_C) \dot{U}_C \\ &= \Delta Y_A \dot{U}_A + \Delta Y_B \dot{U}_B + \Delta Y_C \dot{U}_C \end{aligned} \quad (3-19)$$

式中, \$Y\_0\$ 为三相设备绝缘导纳的平均值。

同理, 干扰电流为

$$I_{in} = \Delta Y_{AX} \dot{U}_A + \Delta Y_{BX} \dot{U}_B + \Delta Y_{CX} \dot{U}_C \quad (3-20)$$

当绝缘有缺陷时, 不平衡电流增加 \$\Delta I\$,

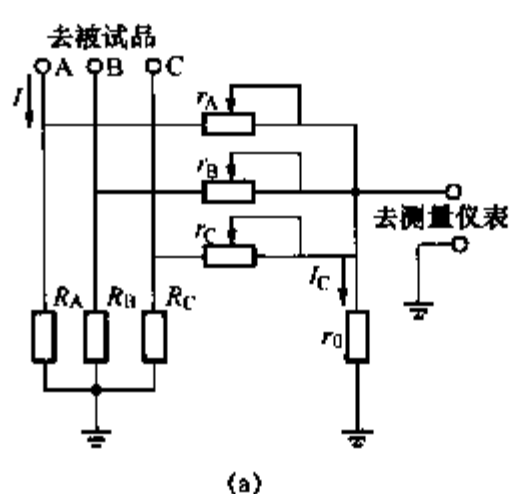
$$I'_e = I_e + \Delta I \quad (3-21)$$

与正常电流之比为

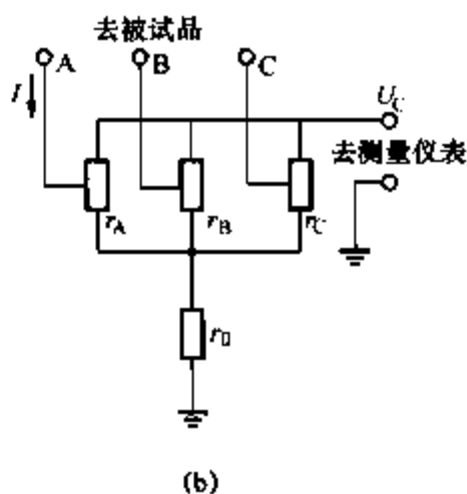
$$K_e = \frac{|I'_e + I_{in}|}{|I_e + I_{in}|} = \frac{|I_e + I_{in} + \Delta I|}{|I_e + I_{in}|} \quad (3-22)$$

如果缺陷严重, \$\Delta I\$ 增大, \$K\_e\$ 增大, 但 \$\Delta I\$ 不仅大小会发生变化, 相位也会改变, 有可能导致 \$K\_e\$ 减小, 降低灵敏度。从式 3-22 可以看出必须减少不平衡电流和干扰电流, 使被测电流的三相系统对称化。为此在测量线路引入对称化装置进行补偿, 以改变每一个试品向测量装置输入的电流传递系数, 使通过被测三相电流达到星形对称, 消除不平衡电流的影响和干扰电流的影响。

对称化装置分为电阻式和变压器式两种。原理接线图分别如图 3-28 和图 3-29 所示。



(a)



(b)

图 3-28 电阻式对称化装置原理接线图

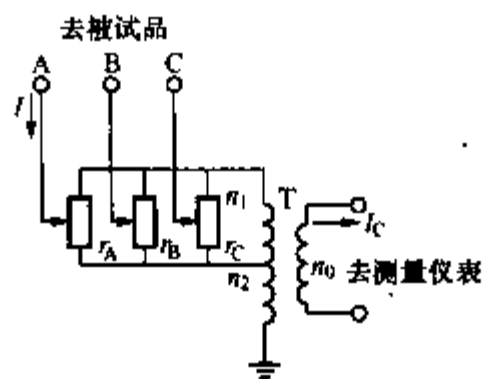


图 3-29 变压器式对称化装置原理接线图

### 2. 电桥法

电桥法一般用于带电检测, 以西林电桥原理为基础。测量电路由标准测量装置和基准电压回路组成, 图 3-30 所示为其原理接线图。

桥体内部装有低压标准电容 \$C\_N\$, 电压互感器 TV 是基准电压源, 隔离变压器 T、移相元

件  $C$  和  $R$  用来移动相位, 补偿测量系统误差。

当电桥平衡时, 可以测得  $\tan\delta$  值和电容量  $C_x$

$$\tan\delta_x \approx \omega C_4 R_4 + \omega C_N R_4 = \omega C_4 R_4 + \Delta \tan\delta$$
  
(3 - 23)

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{C_N}{K}$$
  
(3 - 24)

式中,  $K$  为 TV 的变比。

实际应用中, 常从电容型设备的末屏取信号, 为此必须对末屏接地进行改造, 图 3 - 31 是改造示意图。

设备运行时, 刀闸  $K$  合上。带电测试时, 在接好测试回路后, 拉开刀闸  $K$  进行测量。

还有用同相设备作为标准电容器和作为标准支路分压器的测量方法, 这里不再一一叙述, 其原理接线图如图 3 - 32 和 3 - 33 所示。

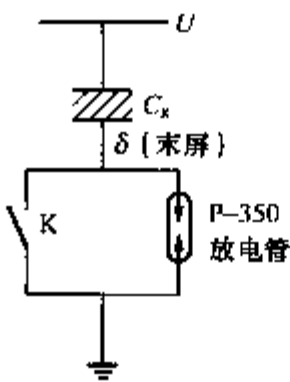


图 3 - 31 电容型设备末屏接地示意图

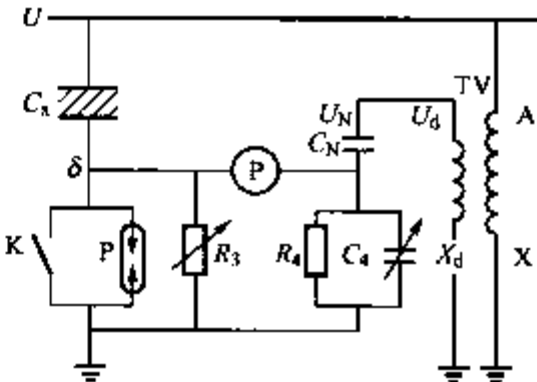


图 3 - 32 用同相设备作为标准电容器的原理接线图

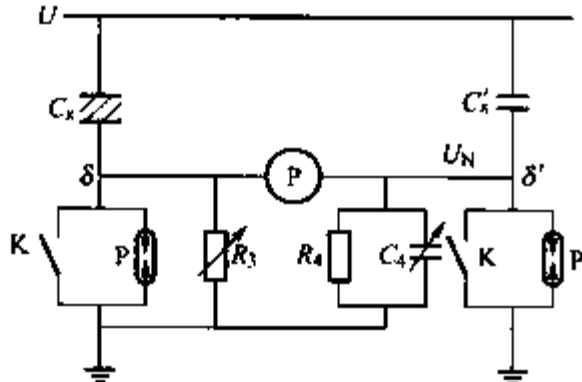


图 3 - 33 用同相设备作为标准支路分压器的原理接线图

3. 过零检测法

又称相位直接比较法, 通过测量流过设备绝缘的电流和作用在设备上的电压信号波形相邻过零点之间的时间差, 再换算成相角差  $\delta$ 。原理框图如图 3 - 34 所示。

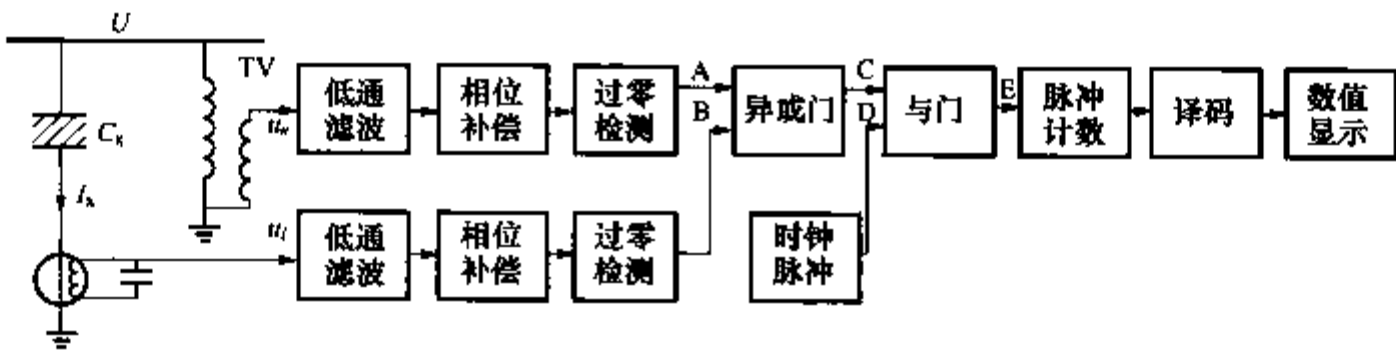


图 3 - 34 过零检测法原理框图

从套在设备接地线上的小 TA 抽取表示电流信号的  $u_i$ , 由于小 TA 二次侧负载为电容, 因此  $u_i$  相对实际电流  $I_x$  移相了  $90^\circ$ 。从 TV 抽取的系统电压信号  $u_u$  与  $u_i$  之间的夹角就是介质损失角  $\delta$ 。比较这两个信号的相位就可以求得  $\tan\delta$ 。过程如图 3 - 35 所示。

$u_i$ 、 $u_u$  经低通滤波器滤除高次谐波后, 进行相位补偿校正, 进入过零比较器整形为方波 A 和 B, 在异或门相减后, 得到宽度为  $\tau$  的方波。将此方波和由时钟脉冲发生器产生的等间

隔脉冲 D 共同输入与非门, 输出的为在方波延续时间内的部分脉冲 E, 计数器数出脉冲数, 乘以脉冲周期即可确定两个信号过零点的间隔时间, 换算后可得相角差。

4. 数字波形分析法

数字波形分析法是基于谐波分析方法实现的。利用数字波形采集装置记录电压和电流信号, 通过计算机对采集的  $u$ 、 $i$  的时域波形作频域分析, 分离成基波和各次谐波信号, 根据电压和电流的基波幅值  $U_{1m}$  和  $I_{1m}$  及初相角  $\varphi_{1u}$  和  $\varphi_{1i}$ , 就可获得介损角  $\delta = \varphi_{1u} - \varphi_{1i}$  和电容量  $C_x = \frac{I_{1m} \cos(\varphi_{1u} - \varphi_{1i})}{U_{1m} \omega}$ 。原理接线图和相量图如图 3-36 和图 3-37 所示。

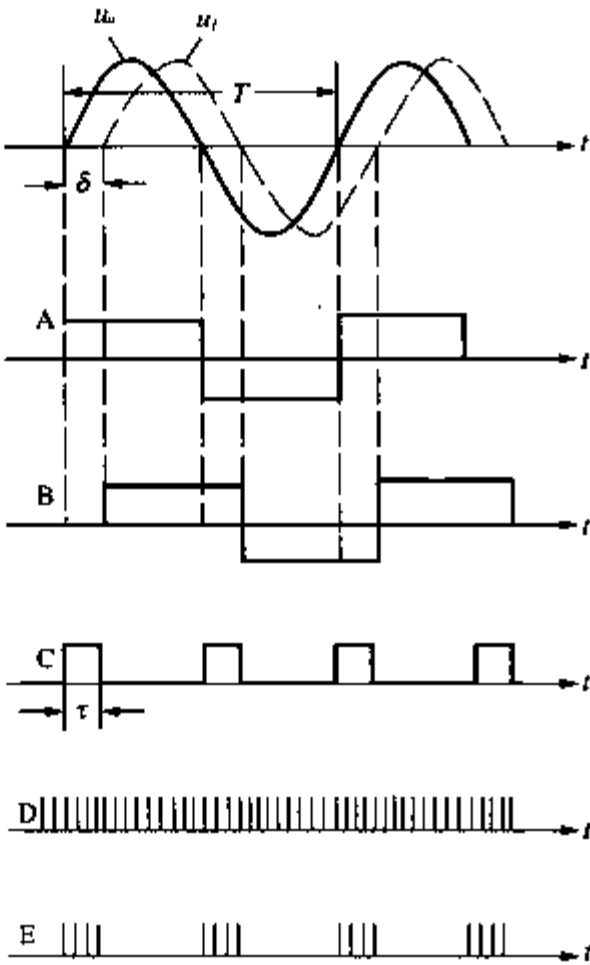


图 3-35 过零检测的工作波形

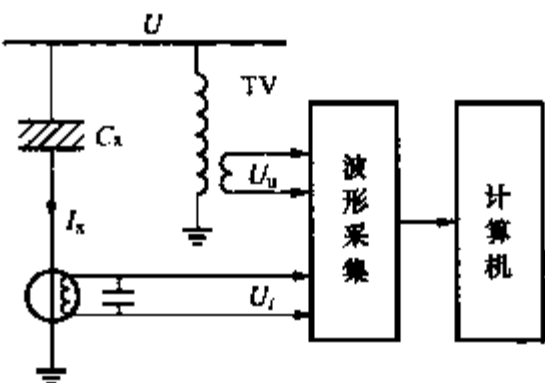


图 3-36 介损测量原理接线图

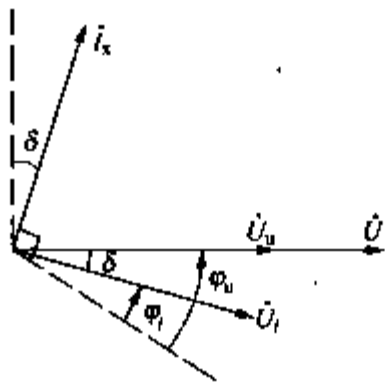


图 3-37 介损测量相量图

五、金属氧化物避雷器的在线监测

金属氧化物避雷器的监测, 主要是测量其在运行电压下的总泄漏电流及阻性电流分量、避雷器阀片的受潮、老化等故障, 这些故障都表现为泄漏电流及阻性电流分量的增大, 而阻性电流分量的变化能较灵敏地反应这些故障。

(1) 监测总泄漏电流。由于泄漏电流中的容性电流分量基本不变, 可以认为总泄漏电流的增加在一定程度上反映了阻性分量电流的增长。在避雷器放电计数器的两端并联一个低内阻的交流微安表就可以测量总泄漏电流, 接线图如图 3-38 所示。

(2) 用补偿法测量阻性电流。测量阻性电流分量能有效反应避雷器阀片的老化。直接测量阻性电流如同对电容型设备测量  $\tan\delta$  那样, 需抽取系统电压信号以补偿泄漏电流中的容性电流分量。用带电检测仪对阻性电流进行测量的模式也有两种, 其测试接线方式如图 3-39 所示。

这种带电检测仪的典型代表是日本的 LCD-4 型泄漏电流检测仪, 工作原理如图 3-40 所示。利用钳形电流互感器从避雷器接地线上取电流信号, 从 TV 二次取电压信号, 电流信号输入仪器的差分放大器 DFA 的 “+” 端, 电压信号输入仪器的差分移相电路 DF, 移相  $90^\circ$

使其与泄漏电流中的容性分量同相，经增益控制放大器 GCA 放大，送入差分放大器 DFA 的“-”端，通过乘法器 M 和积分运算器 I 组成的反馈回路，自动调整增益控制放大器 GCA 的增益，使其大小与容性电流分量大小相等，这样容性电流分量被抵消掉，输出即为阻性电流分量。

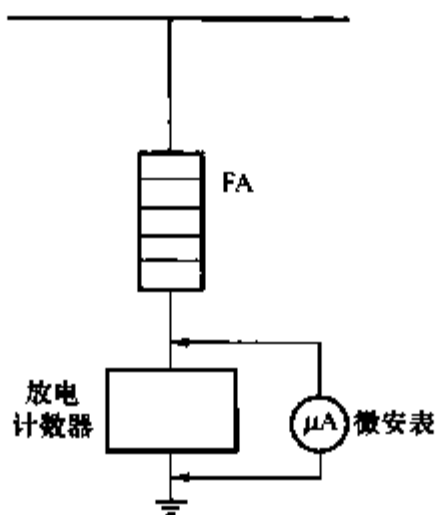


图 3-38 带电测量总泄漏电流接线图

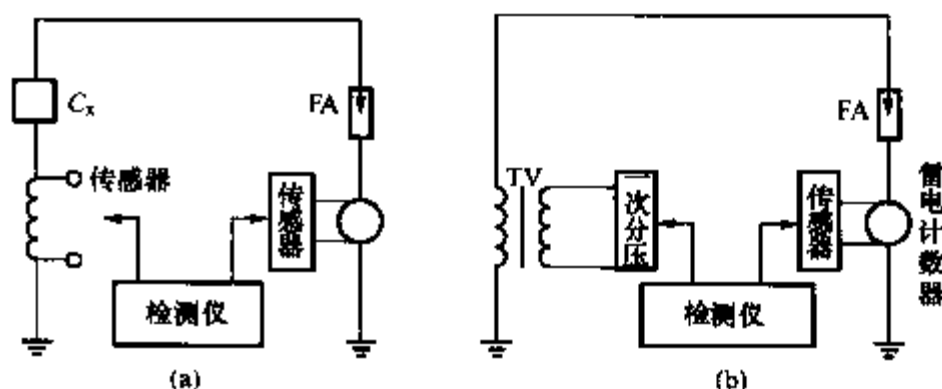


图 3-39 FA 阻性电流带电检测方式  
(a) 同相电容试品电流信号作标准；(b) 电压信号作标准

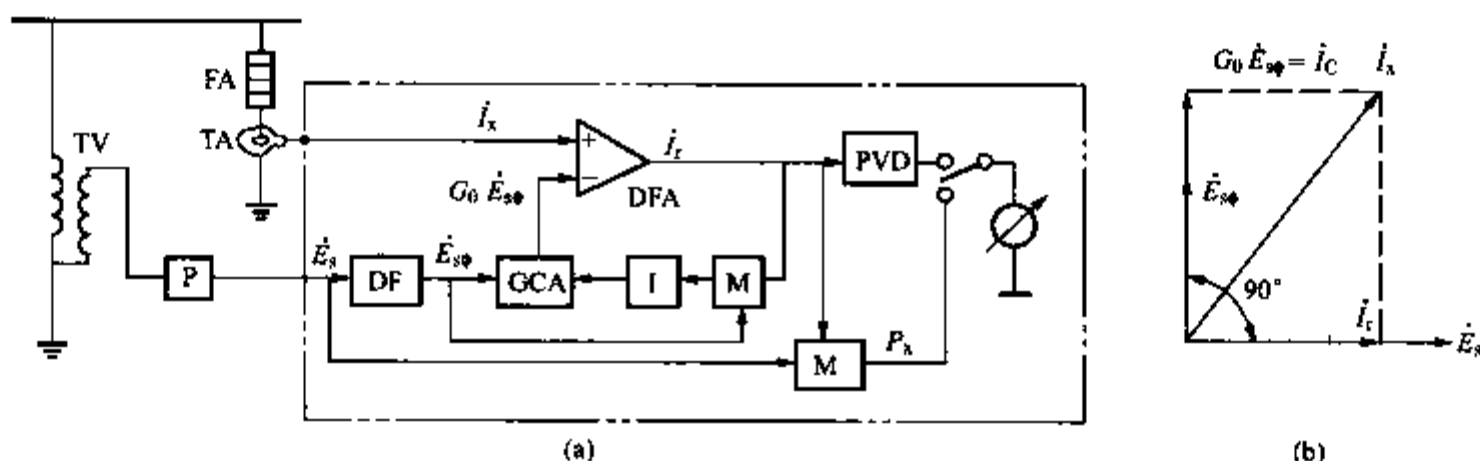


图 3-40 LCD-4 型氧化物避雷器泄漏电流测试仪原理图  
(a) 原理框图；(b) 相量图

P—光电隔离器；TA—钳型电流互感器；M—积分器；DFA—差动放大器；I—积分器；  
GCA—增益控制放大器；DF—差分移相电路；PVD—峰值测量电路

需要注意的是金属氧化物避雷器的泄漏电流测量，受相邻设备和线路的杂散电容影响，往往会导致结果失真。一般避雷器是“一”字形排列的，中间 B 相的避雷器受两个边相的电场干扰基本上是相互抵消的，通常可得到基本正确的阻性电流测试结果，而两个边相的测试结果却受到相间干扰的严重影响，会导致 A 相测试结果偏大、C 相测试结果偏小。因此有的检测仪考虑了相间干扰补偿功能，可根据测得的相间干扰夹角及当前的测试相别，自动对相间干扰进行补偿。但应注意，该补偿功能仅对三相金属氧化物避雷器呈“一”字形对称排列的情况下有效，如果现场的电场分布情况较为复杂，仅用补偿也难以获得满意的抗干扰效果。

(3) 用数字波形分析法在线监测泄漏电流。数字波形分析法是采用数字化测量和谐波分析技术测量泄漏电流峰值、阻性电流峰值和功率损耗，能连续实时采集、存储信号波形，进行智能化分析和计算，并能消除谐波和相间干扰的影响。接线图如图 3-41 所示。

泄漏电流信号从避雷器接地线测量，电压信号从同相 TV 的二次侧取得，送入数字化测量系统（主机），进行谐波分析，从而计算出基波、三次谐波等的泄漏电流、容性电流分量

和阻性电流分量,并得出电流峰值。

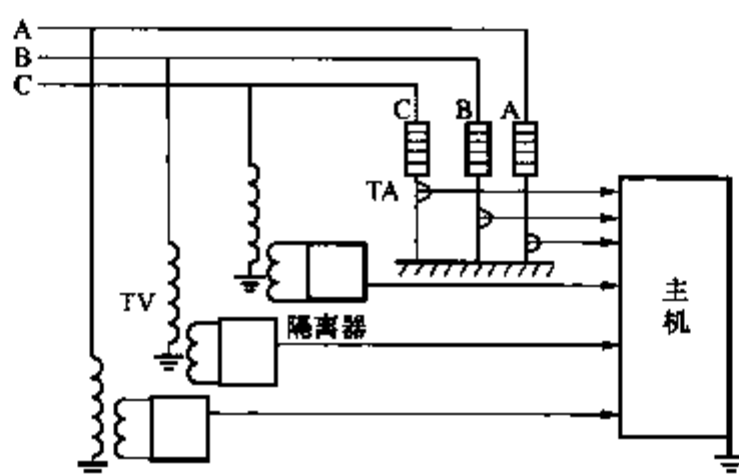


图 3-41 氧化锌避雷器在线监测原理图

### 小 结

绝缘电阻和吸收比的大小反映了绝缘的状况,通常采用兆欧表进行测量。直流泄漏电流的测量是在较高的直流电压作用下进行的,能发现被试品中一些尚未贯通的集中性缺陷,测量时应注意微安表的保护。用西林电桥测量  $\tan\delta$  时有正接线和反接线两种接线方式,当电桥平衡时,  $\tan\delta = C_4$  的微法数。局部放电测试通常测定的是视在放电量,有三种常用的测量回路,为了提高抗干扰能力,可以采用平衡法。绝缘油的试验是监督油质变化的有效手段,油中溶解气体的气相色谱分析能用来判断充油设备内部故障的性质。耐压试验是一种确认电气设备绝缘可靠性的试验,具有一定破坏性,应在检查性试验合格后再进行。绝缘的在线监测可以对运行工况下的设备状态进行连续、实时的监测,具有真实性强、灵敏度高、反映及时等特点。

### 习 题

- 3-1 测量绝缘电阻时,什么情况下应考虑使用屏蔽环?
- 3-2 画出进行泄漏电流测量时微安表的保护电路,并分析其保护原理。
- 3-3 用 QS1 型西林电桥测量  $\tan\delta$  时有几种接线方式?各适用于什么场合?
- 3-4 简述局部放电测试的原理和测量方法。
- 3-5 绝缘在线监测有何意义?

## 第四章 高压试验设备及高电压的测量

高压试验设备是指产生交流、直流以及冲击等各种高电压的试验设备,它们产生的各种波形的高电压可用来模拟电气设备在运行中可能受到的各种作用电压,进行绝缘的耐压试验以考验绝缘耐受这些高电压作用的能力。

高电压的测量难度较大,对应于不同的测试对象有不同的测试方法。

### 第一节 稳态高压试验设备及其测量

稳态高压试验主要是指交流耐压试验和直流耐压试验,与之相应的试验设备称为稳态高压试验设备。

#### 一、交流高压试验设备

交流高压试验设备主要指用于高压试验的特制变压器,即高压试验变压器。本节除介绍高压试验变压器外,还介绍高压串联谐振试验装置。

##### 1. 高压试验变压器

高压试验变压器进行试验时的接线如图 4-1 所示。

图中 T 为试验变压器,用来升高电压;TA 为调压器,用来调节试验变压器的输入电压;F 为保护球隙,用来限制试验时可能产生的过电压,以保护被试品; $R_1$  为保护电阻,用来限制被试品突然击穿时在试验变压器上产生的过电压及限制流过试验变压器的短路电流,一般取  $0.1 \sim 1 \Omega/V$ ;  $R_2$  为球隙保护电阻,用来限制球隙击穿时流过球隙的短路电流,以保护球隙不被灼伤,一般取  $0.1 \sim 0.5 \Omega/V$ ;  $C_x$  为被试品。

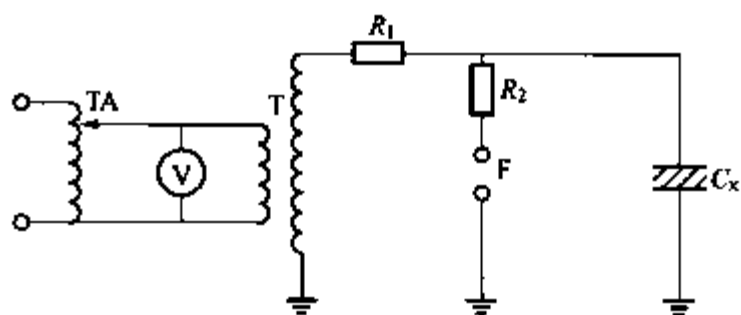


图 4-1 工频耐压试验接线

高压试验变压器一般都是单相的,在原理上与电力变压器并无区别,但由于使用中的特殊要求,所以在结构和性能上有如下特点。

- (1) 电压高,其高压绕组的额定电压应不小于被试品的试验电压值。
- (2) 绝缘裕度小,只在试验条件下工作,不会遭受雷电过电压及电力系统内部过电压的作用。
- (3) 连续运行时间短,发热较轻,不需要复杂的冷却系统,但由于其绝缘裕度小,散热条件又差,所以一般不允许在额定电压下长时间连续使用。
- (4) 漏抗较大,试验变压器变比大,高压绕组电压高,所以需用较厚的绝缘层和较宽的间隙距离,漏抗较大。
- (5) 容量小,被试品的绝缘一般为电容性的,在试验中,被试品放电或击穿前,试验变压器只需要为被试品提供电容电流和泄漏电流;如果被试品被击穿,开关立即切断电源,不

会出现长时间的短路电流。所以试验变压器的容量一般不大,可按被试品的电容来确定,即

$$S = 2\pi f C_X U^2 \times 10^{-3} \quad (4-1)$$

式中  $U$  ——被试品的试验电压, kV;

$C_X$  ——被试品的电容,  $\mu\text{F}$ ;

$f$  ——电源的频率, Hz;

$S$  ——试验变压器的容量, kVA。

对于大多数被试品,通常试验变压器高压侧额定电流在  $0.1 \sim 1\text{A}$  范围内就可满足试验要求。

由于试验变压器的体积和质量随其额定电压值的增加而急剧增加,故单个变压器的电压都限制在  $1000\text{kV}$  以下,目前国产变压器的电压限制在  $750\text{kV}$ 。当需要更高的输出电压时,可将  $2 \sim 3$  台试验变压器串接起来使用。

图 4-2 所示为常用的三台试验变压器串接的原理接线图。三台试验变压器高低压绕组的匝数分别对应相等,高压绕组串联起来输出高电压。为给下一级试验变压器提供电源,前一级变压器里增设了累接绕组,该绕组与所属试验变压器的高压绕组串联,匝数与低压绕组相同,故各台试验变压器高压绕组的电压相等。在串接式试验装置中,各台试验变压器高压绕组的容量是相同的,但各低压绕组和累接绕组的容量并不相同,如略去各变压器的励磁电流,则三级串接时各绕组的电压、电流关系如图 4-2 所示,由图可知:

$T_3$  的容量  $S_3 = U_4 I_4 = U_2 I_2$

$T_2$  的容量  $S_2 = U_3 I_3 = U_2 I_2 + U_4 I_4 = 2U_2 I_2 = 2S_3$

$T_1$  的容量  $S_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 + U_3 I_3 = U_2 I_2 + 2U_2 I_2 = 3U_2 I_2 = 3S_3$

即第一、二、三级变压器的容量分别为  $3S_3$ ,  $2S_3$  和  $S_3$ , 而输出容量为  $3S_3$ , 整套串接试验变压器的总容量为  $6S_3$ , 这套装置的利用系数为  $\eta = \frac{S_{\text{输出}}}{S_{\text{总}}} = \frac{3S_3}{6S_3} = 50\%$ ; 若串接的台数为

$n$ , 则总的输出容量为  $nS_n$ , 总的装置容量为  $S_{\text{总}} = S_n + 2S_n + \cdots + nS_n = \frac{n(n+1)}{2} S_n$ , 则  $n$  级串接装置容量的利用系数为

$$\eta = \frac{S_{\text{输出}}}{S_{\text{总}}} = \frac{nS_n}{\frac{n(n+1)}{2} S_n} = \frac{2}{n+1} \quad (4-2)$$

可见,随着试验变压器串接台数的增加,利用率降低。实际中,串接的试验变压器台数一般不超过三台。

由图 4-2 还可看出,  $T_2$ 、 $T_3$  的外壳对地电位分别为  $U_2$  和  $2U_2$ , 因此二者应分别用具有相应绝缘水平的绝缘支架或支柱绝缘子支撑起来,保持对地绝缘。

高压试验变压器的调压装置应能从零值平滑地改变电压,最大输出电压(容量)应等于或稍大于试验变压器初级额定电压(额定容量),输出波形应尽可能接近正弦波,漏抗应尽可能小,使调压器输出电压波形畸变小。常用的调压装置有:自耦调压器、移圈式调压器、感应调压器和电动发电机组。

自耦调压器调压范围广、漏抗小、波形畸变小、体积小、价格低,但由于滑动触头调压易发热,所以容量小,一般适用于  $10\text{kVA}$  以下的试验变压器的调压。

移圈式调压器一般有三个绕组套在闭合 E 字铁心上,其中两个为匝数相等、绕向相反

互相串联的固定绕组，另一个为套在这两绕组之外的短路绕组，移动短路绕组改变它与两固定线圈间的相互位置，便可达到调压的目的。由于调压器不存在滑动触头，故容量大；但由于两固定绕组各自形成的主磁通不能完全通过铁心形成闭合磁路，所以漏抗较大，且随短路绕组的位置而异，从而使输出波形产生不同程度的畸变。因此这种调压方式被广泛地应用在对于容量要求较大、对波形要求不十分严格的场合。

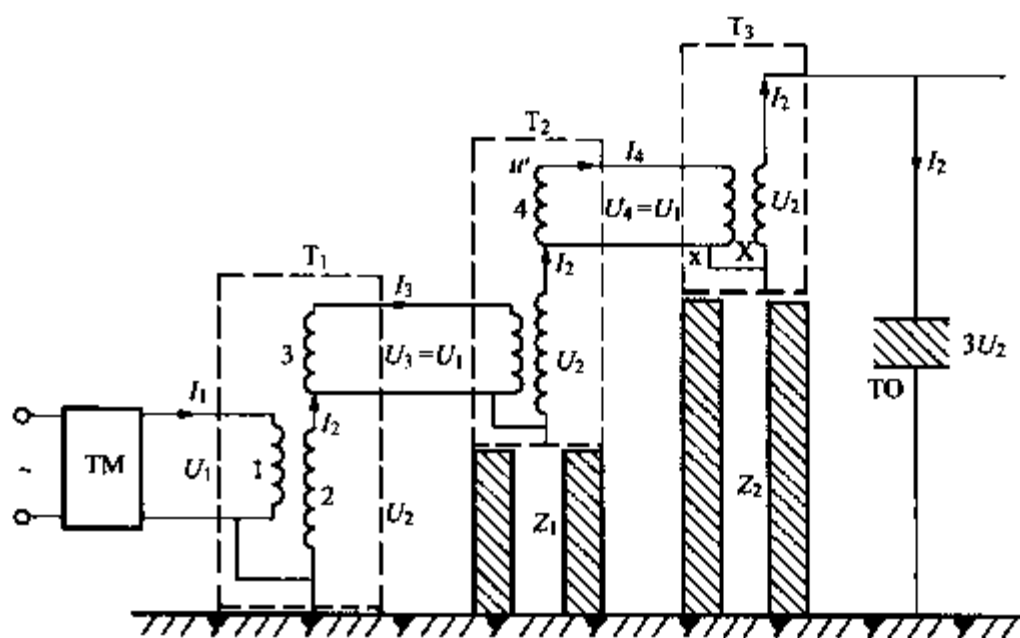


图 4-2 累接式串接试验变压器的原理接线

$T_1, T_2, T_3$ —三级试验变压器；1—低压绕组；2—高压绕组；3, 4—累接绕组； $Z_1, Z_2$ —绝缘支柱；TM—调压器；TO—被试品

感应调压器的调压性能与移圈式调压器相似，但输出波形畸变较大，漏抗也较大，且价格较贵，故一般很少采用。

电动发电机组调压方式不受电网电压质量的影响，能得到很好的正弦电压波形和均匀的电压调节，但这种调压设备价格昂贵，运行费用高，只适合于对试验要求很高的场合。

## 2. 串联谐振试验装置

在现场耐压试验中，当被试品的试验电压较高或电容值较大，试验变压器的额定电压或容量不能满足要求时，可采用串联谐振试验装置进行试验。试验的原理接线图和等值电路如图 4-3 所示。等值电路中  $R$  为代表整个试验回路损耗的等值电阻， $L$  为可调电感和电源设备漏感之和， $C$  为被试品电容， $U$  为试验变压器空载时高压端对地电压。

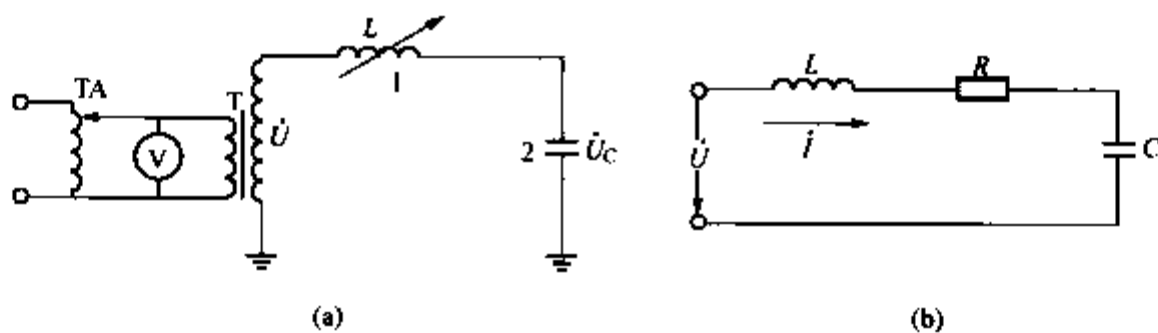


图 4-3 串联谐振试验线路原理图

(a) 原理图；(b) 电路图

1—外加可调电感；2—被试品

当调节电感使回路发生谐振时， $X_L = X_C$ ，被试品上的电压  $U_C$  为

$$U_C = IX_C = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega CR} U = QU \quad (4-3)$$

式中， $Q$  为谐振回路的品质因数，为谐振时感抗（容抗）与回路中电阻  $R$  的比，所以也有  $Q = \frac{\omega L}{R}$ 。

谐振时  $\omega L$  远大于  $R$ ，即  $Q$  值较大，故用较低的电压  $U$  便可在被试品两端获得较高的试

验电压。谐振时高压回路流过相同的电流  $I$ ，而  $U = U_c/Q$ ，所以试验变压器的容量在理论上仅需被试品容量的  $1/Q$ 。

利用串联谐振电路进行工频耐压试验，不仅试验变压器的容量和额定电压可以降低，而且被试品击穿时，由于  $L$  的限流作用使回路中的电流很小，可避免被试品被烧坏。此外，由于回路处于工频谐振状态，电源中的谐波成分在被试品两端大为减小，故被试品两端的电压波形较好。

## 二、直流高压试验设备

直流高电压通常是由交流高电压经整流变换而来的，图 3-2 和图 3-3 所示为基本的半波整流电路，它们能获得最高直流电压为工频试验变压器输出交流电压的峰值  $U_m$ 。为了得到更高的直流电压，可采用图 4-4 所示的倍压整流电路。可以看出，图 4-4 (a) 所示的倍压整流电路实质上是两个半波整流电路的叠加，它已广泛地作为绝缘芯式变压器直流高压装置的基本单元。这种回路变压器次级绕组对地是绝缘的。在图 4-4 (b) 中，负半波期间充电电源经  $V_1$  向  $C_1$  充电达  $U_m$ ，正半波期间充电电源与  $C_1$  串联起来经  $V_2$  向  $C_2$  充电达  $2U_m$ ，这种电路的优点是便于得到更高的直流电压，已成为目前直流高压串级发生器的基本单元。

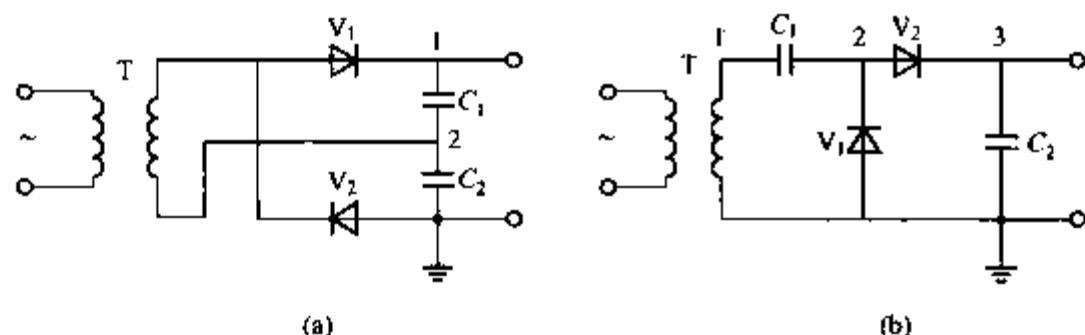


图 4-4 倍压整流电路

(a) 变压器两端不接地；(b) 变压器一端接地

倍压整流电路只能获得  $2U_m$  的电压，如果需要更高的电压，可采用图 4-5 所示的串接整流电路。其工作原理与图 4-4 的倍压整流电路类似，电源为负半波时依次给左柱电容器充电，而电源为正半波时依次给右柱电容器充电。空载时， $n$  级

串接的整流电路可输出  $2nU_m$  的直流电压。但随着串接级数的增多，接入负载时的电压脉动和电压降落迅速增大。

当被试品击穿时，除右柱电容器串联起来向被试品放电外，左柱电容器  $C'_1 \sim C'_{n-1}$  串联后也经  $V_1$ 、 $V'_n$  向被试品放电。为避免缺陷扩大，同时也为了保护高压硅堆  $V_1$  和  $V'_n$ ，应在被试品前串联足够大的电阻  $R_f$ 。

## 三、稳态高压的测量

这里所介绍的稳态高压的测量装置和方法主要是针对直流高电压和工频交流高电压的。有的也可用于频率在一定范围内的高频高电压或脉动成分很大的直流高电压的测量。

IEC 和我国国家标准规定，交流高电压峰值或有效值的测量误差应不大于  $\pm 3\%$ ；直流电压平均值的测量误差应不大于  $\pm 3\%$ ，脉动幅值的测量误差应不大于  $10\%$ 。

目前常用的测量设备和方法分述如下。

### (一) 球隙

测量球隙是由一对直径相同的金属球构成的。加电压

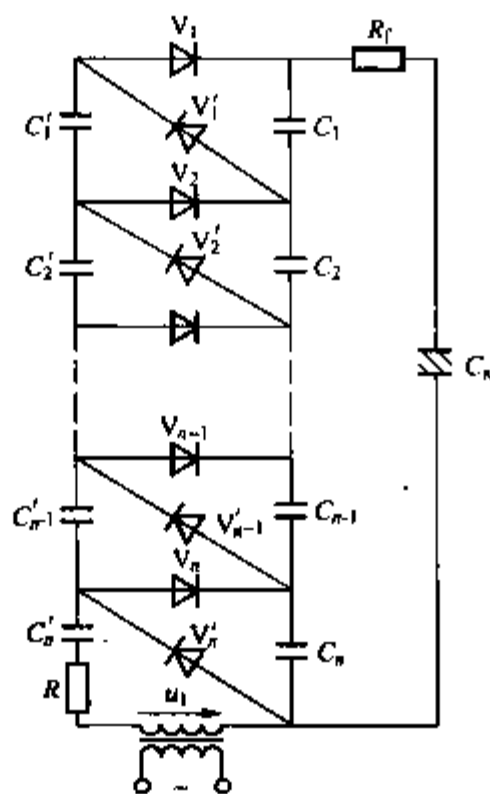


图 4-5 串接整流电路

时,球隙间形成稍不均匀电场,当保持各种外界条件不变时,球间隙在大气中的击穿电压取决于球隙距离。球隙就是利用这个原理来直接测量各种类型的高电压,而且是唯一能直接测量高达数兆伏的各类高电压峰值的测量装置。

IEC 和国标严格规定了在标准大气条件下测量所用球隙的结构、布置和连接,并制定了标准球径的球隙放电电压与球间隙距离的关系表,如附表 5~附表 7 所示,其误差不超过 3%,使用时可查阅。

用球隙测量工频电压时,应取连续三次放电电压的平均值,相邻两次放电的间隔时间不得小于 1min,以便在每次放电后让气隙充分地去游离,各次击穿电压与平均值之间的偏差不得大于 3%。如测量时的大气条件不同于标准大气条件,则应按第一章中所述方法予以校正,这样可保证工频高电压峰值的准确度在要求的范围内。

### (二) 静电电压表

静电电压表由两个平行平板电极构成,其中一个为固定电极,另一个为可动电极。当施加稳态电压时,两电极分别带上异性电荷,由于静电力的作用,可动电极发生转动,用某种方式加外力于可动电极,使之与静电力平衡。由于静电力的大小与电极上的电荷多少有关,因而也就与电极间的电压大小有关,因此测定了平衡力也就能知道电压的大小。

静电电压表可直接用来测量交流和直流高电压。由于电极上所受的力和电压的平方成正比,所以,静电电压表指示的是电压的方均根值。故用静电电压表测量交流电压时,指示的是被测电压的有效值;测直流电压时,当脉动系数不超过 20%时,测得的数值与平均值的误差不超过 1%,故可认为在直流下静电电压表的测量值为平均值。静电电压表的测量误差一般为 1%~1.5%。

### (三) 高压分压器

当被测电压很高时,直接用指示仪表测量高电压比较困难,采用分压器分出小部分电压,然后用测量仪器进行测量,将测量值乘以分压比便可得到待求高电压。根据分压器所用分压元件的不同,分为电阻分压器、电容分压器和阻容分压器等三种类型。每一分压器都由高压臂和低压臂组成,在低压臂上得到的就是分给测量仪器的低电压  $u_2$ ,总电压  $u_1$  与  $u_2$  之比称为分压器的分压比 ( $N$ )。

#### 1. 电阻分压器

它由高压臂电阻  $R_1$  和低压臂电阻  $R_2$  串联而成,理想情况下的分压比为

$$N = \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4-4)$$

测量稳态高电压时,电阻分压器的阻值不能选得太小,否则会使直流高压装置和工频高压装置供给它的电流太大,电阻本身的热损耗也太大,以致阻值因温升而变化,增加测量误差。但阻值也不能选得太大,否则由于工作电流过小而使电晕电流、绝缘支架的泄漏电流所引起的误差变大。一般选择其工作电流在 0.5~2.0mA 之间,实际上常选 1mA。

需要注意的是,测量交流高压时,由于对地杂散电容的不利影响,不但会引起幅值误差,还会引起相位误差。被测电压越高、分压器本身的阻值越大、对地杂散电容越大,出现的误差也越大。因此通常在被测交流电压大于 100kV 时,大多采用电容分压器,而不用电阻分压器。

另一种测直流高压的常用而又比较方便的方法,是用高值电阻串联微安表测量。用已知

高值电阻  $R$  串接微安表, 如果流过微安表的电流为  $I$ , 则被测电压  $U_1$  为

$$U_1 = IR \quad (4-5)$$

这种测量方法与电阻分压器法相比主要的不足之处在于, 当外界条件改变而导致高值电阻阻值变化时, 测量结果也会随之变化。

## 2. 电容分压器

测量交流高压时常采用电容分压器, 它由高压臂电容  $C_1$  和低压臂电容  $C_2$  串联而成, 如图 4-6 所示。为了防止外电场对测量电路的影响, 通常用高频同轴电缆来传输被测量的电压信号。当然该电缆的电容应计入低压臂的电容量  $C_2$  中。

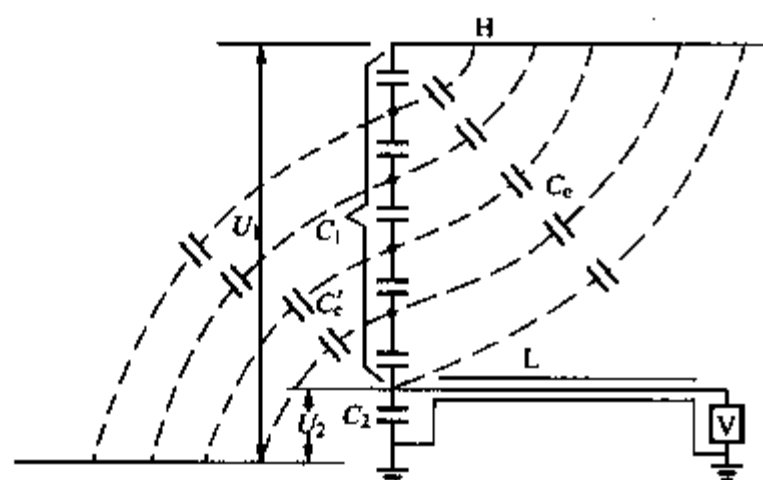


图 4-6 工频分压器测压电路  
H—高压引线; L—同轴电缆

为了保证测量的准确度, 测量仪表在被测电压频率下的阻抗应足够大, 至少要比分压器低压臂的阻抗大几百倍。为此最好用高阻抗的静电式仪表或电子式仪表。若略去杂散电容的影响, 电容分压器的分压比为

$$N = \frac{u_1}{u_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (4-6)$$

分压器高压臂对地杂散电容  $C'$  和对高压端杂散电容  $C''$  的存在, 会在一定程度上影响其分压比。不过只要周围环境不变, 这种影响就是固定的, 不随被测电压的幅值、频率、

波形或大气条件等因素而变。所以, 对一定的环境, 只要一次准确地测出电容分压器的分压比, 则此分压比可适用于各种工频高压的测量。虽然如此, 人们仍然希望尽可能使各种杂散电容的影响相对减小, 为此对无屏蔽的电容分压器应适当增大高压臂的电容值。

电容分压器的另一个优点是它几乎不吸收有功功率, 不存在温升和随温升而引起的各部分参数的变化, 因而可以用来测量很高的电压。当然应该注意高压部分的电晕放电, 为此应在分压器的顶部加装均压罩, 各电容相连接的法兰处加装均压环。

## 3. 阻容分压器

按阻尼电阻的接法不同, 阻容分压器又分为串联阻容分压器和并联阻容分压器两类。前者的测量回路与电容分压器相同, 后者的测量回路与电阻分压器相同。

### (四) 交流峰值电压表

由于交流电压下, 绝缘的击穿取决于电压的峰值, 所以有时需要测量高电压的峰值。峰值电压表就是用来测量周期性波形及一次过程波形峰值的电压表。目前常用的交流峰值电压表有以下两种类型。

#### 1. 利用电容电流整流测量峰值电压

如图 4-7 (a) 所示, 被测电压为  $u$ , 流过高压电容的交流电流  $i_c$  负半波时通过整流管  $V_2$ , 正半波时经过整流管  $V_1$  及检流计  $P$  流回电源。如果流过  $P$  的电流平均值为  $I_{av}$ , 那么它与被测电压的峰值  $U_m$  之间存在如下关系

$$U_m = \frac{I_{av}}{2Cf} \quad (4-7)$$

式中  $C$  ——电容器的电容量,  $F$ ;

$f$ ——被测电压的频率, Hz。

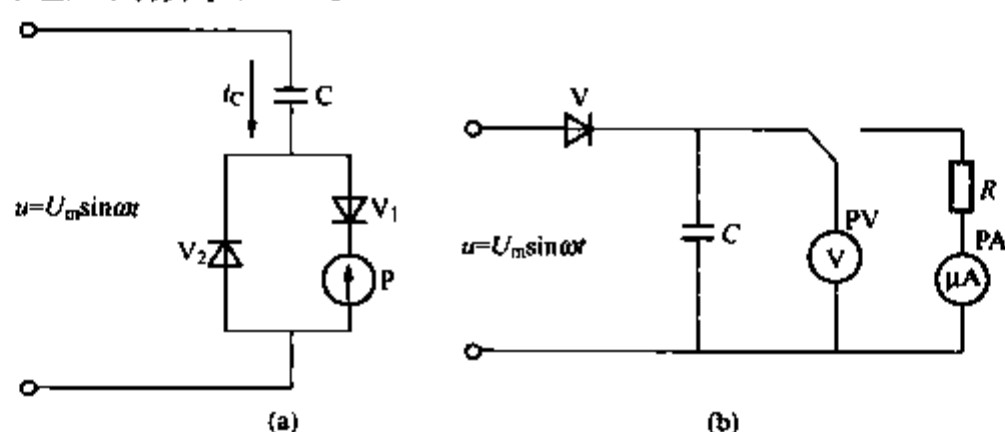


图 4-7 峰值电压表原理接线图

(a) 利用电容电流整流; (b) 利用电容器整流充电电压

## 2. 利用电容器上的整流充电电压测量峰值电压

如图 4-7 (b) 所示, 幅值为  $U_m$  的被测交流电压经整流器 V 使电容 C 充电到某一电压  $U_d$ ,  $U_d$  可用静电电压表或用高值电阻串联微安表测得。如用后一种测量方法, 则被测电压的峰值为

$$U_m = \frac{U_d}{1 - \frac{T}{2RC}} \quad (4-8)$$

式中  $T$ ——交流电压的周期, s;

$C$ ——电容器的电容量, F;

$R$ ——串联电阻的阻值,  $\Omega$ 。

当  $RC \geq 20T$  时, 式 (4-7) 的误差  $\leq 2.5\%$ 。

## 第二节 冲击高压试验设备及其测量

冲击高压试验设备主要指冲击电压发生器, 它是一种产生脉冲波的高电压发生装置, 能模拟产生电气设备在运行中遭受的雷电冲击电压波和操作冲击电压波。

由于冲击电压是一种非周期性快速或较快速变化的脉冲电压, 因此测量冲击高电压的仪器和测量系统必须具有良好的瞬态响应特性, 冲击电压的测量包括峰值测量和波形记录两个方面。

### 一、冲击电压发生器

雷电冲击电压是利用冲击电压发生器产生的, 操作冲击电压既可以利用冲击电压发生器产生, 也可以利用冲击电压发生器与变压器联合产生。

#### 1. 雷电冲击电压的产生

冲击电压发生器是利用高压电容器通过球隙对电阻电容回路放电来产生雷电冲击电压的。冲击电压发生器的两种基本回路如图 4-8 (a)、(b) 所示。主电容  $C_1$  在被球间隙 F 隔离的状态下由整流电压充电到稳态电压  $U_0$ 。间隙 F 被点火击穿后, 电容  $C_1$  上的电荷一方面经  $R_2$  放电, 同时  $C_1$  通过  $R_1$  对电容  $C_2$  充电, 在被试品 (与  $C_2$  并联) 上形成上升的电压波前。当  $C_2$  上的电压被充到最大值后, 反过来又与  $C_1$  一起对  $R_2$  放电, 在被试品上形成下降的电压波尾。被试品的电容可以等值地并入电容  $C_2$  中。一般选择  $R_2$  比  $R_1$  大得多,  $C_1$  比

$C_2$  大得多, 这样就可以在  $C_2$  上得到所要求的波前较短 (波前时间常数  $\tau_1 = R_1 C_2$  较小) 而半峰值时间较长 (波尾时间常数  $\tau_2 = R_2 C_1$  较大) 的冲击电压波形。 $R_1$  和  $C_2$  影响冲击电压的波前时间, 分别称为波前电阻和波前电容;  $R_2$  和  $C_1$  影响波尾时间, 分别称为波尾电阻和主电容。

在  $C_1$  向  $C_2$  充电过程中, 如果忽略  $C_1$  经  $R_2$  放掉的电荷, 则在图 4-8 (b) 的电路中,  $C_2$  上的电压最大可达

$$U_{2m} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 \quad (4-9)$$

而在图 4-8 (a) 的电路中, 除了电容上的电荷分布外, 还有  $R_1$  和  $R_2$  的分压作用,  $C_2$  上的最大电压为

$$U_{2m} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 \quad (4-10)$$

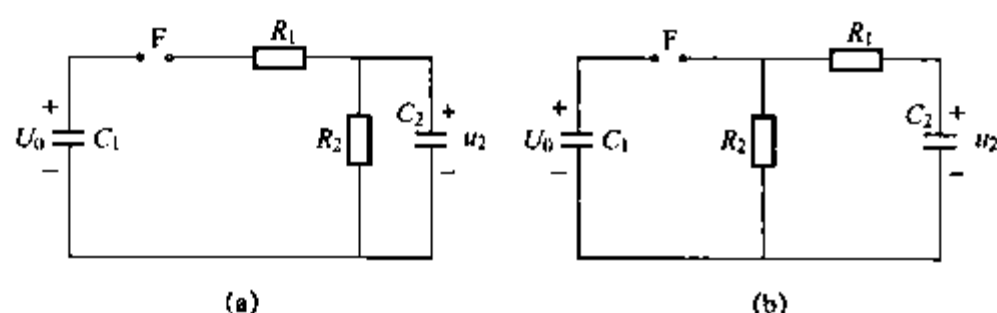


图 4-8 冲击电压发生器的基本回路

(a) 低效率回路; (b) 高效率回路

输出电压峰值  $U_m$  与  $U_{2m}$  之比称为冲击电压发生器的利用系数 ( $\eta$ )。由上可知, 图 4-8 (b) 的利用系数要比图 4-8 (a) 高, 所以称为高效率回路, 图 4-8 (a) 称为低效率回路。为了提高冲击电压发生器的利用系数, 应该选择  $C_1$  比  $C_2$  大得多。

为了满足结构布局等方面的要求, 实际冲击电压发生器通常采用图 4-9 所示的回路, 这里  $R_1$  被拆为  $R_{11}$  和  $R_{12}$  两部分, 分置在  $R_2$  前后, 其中  $R_{11}$  为阻尼电阻, 主要用来阻尼回路中的寄生振荡;  $R_{12}$  用来调节波前时间, 因而称之为波前电阻。这种回路的利用系数显然介于上面两种回路之间, 可近似地用下式求得

$$\eta \approx \frac{R_2}{R_{11} + R_2} \times \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (4-11)$$

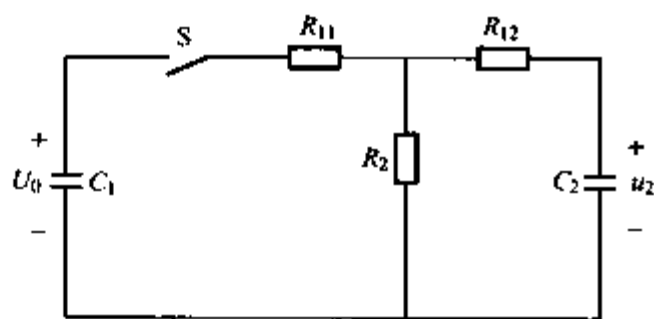


图 4-9 冲击电压发生器的常用回路

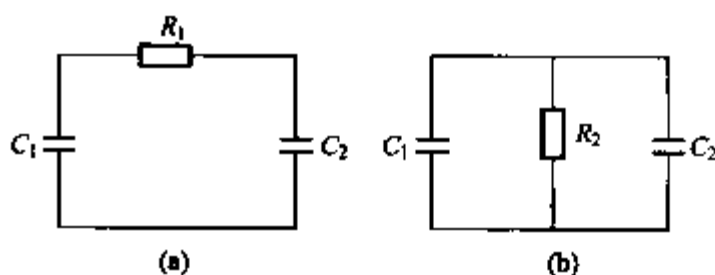


图 4-10 决定冲击波波形的等值电路

(a) 决定波前时间; (b) 决定半峰值时间

下面以图 4-8 所示回路为基础来分析回路元件与输出冲击电压波形的关系。为使问题简化, 在决定波前时间时忽略  $R_2$  的作用, 而在决定半峰值时间时忽略  $R_1$  的作用。于是可得图 4-10 (a)、(b) 所示的等值电路。

由图 4-10 (a) 所示电路可得, 在冲击波的波前部分,  $C_2$  上的电压可用下式表示

$$u(t) = U_m (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (4-12)$$

式中  $\tau_1$  ——决定波前的时间常数,  $\tau_1 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ 。

根据冲击波视在波前  $T_1$  的定义, 可知当  $t = t_1$  时,  $u(t_1) = 0.3U_m$ ;  $t = t_2$  时,  $u(t_2) = 0.9U_m$ , 即

$$0.3U_m = U_m(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}) \quad (4-13)$$

$$0.9U_m = U_m(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_1}}) \quad (4-14)$$

波前时间

$$T_1 = 1.67(t_2 - t_1) = 1.67\tau_1 \ln 7 = 3.24R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (4-15)$$

由于对  $R_2$  放电的存在, 实际的波前时间将比上式所示的值稍小一些。

如图 4-10 (b) 所示, 在冲击波的波尾部分,  $C_2$  上的电压可表达为

$$u(t) = U_m e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4-16)$$

式中  $\tau_2$  ——决定波尾的时间常数,  $\tau_2 = R_2(C_1 + C_2)$ 。

根据半峰值时间  $T_2$  的定义, 可得

$$0.5U_m = U_m e^{-\frac{T_2}{\tau_2}} \quad (4-17)$$

由此得

$$T_2 = \tau_2 \ln 2 = 0.7\tau_2 = 0.7R_2(C_1 + C_2) \quad (4-18)$$

式 (4-15) 和式 (4-18) 是在略去了许多影响因素 (如回路电感、测量设备电容等) 后近似推出的, 根据较详细的分析计算和在实际装置上测量校验的经验, 推荐使用下面的修正公式

$$\begin{aligned} T_1 &= (2.3 \sim 2.7)R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \\ T_2 &= (0.7 \sim 0.8)R_2(C_1 + C_2) \end{aligned} \quad (4-19)$$

当回路电感较大时, 上两式中的系数取较小的值。这两个公式可以用来计算冲击电压发生器的参数和调整冲击电压发生器的输出电压波形。

以上介绍的是单级冲击电压发生器的工作原理。由于受到整流设备和电容器额定电压的限制, 单级冲击电压发生器的最高电压一般不超过 200~300kV。如需更高的冲击电压, 可采用多级冲击电压发生器。

图 4-11 所示为一种常用的高效率多级冲击电压发生器。其工作原理概括说来就是利用多级电容器并联充电, 然后通过球隙串联放电, 从而产生高幅值的冲击电压。具体过程为: 先由工频试验变压器  $T$  经整流元件  $V$ 、保护电阻  $R_0$  和充电电阻  $R$  给并联的各级主电容  $C'_1$  充电到  $U'_0$ 。事先调整各球隙的距离, 使他们的击穿电压稍大于  $U'_0$ 。(冲击电压发生器的第一级球隙一般是一个点火球隙, 在其中一个球内安放有一个针极, 当需要发生器动作时, 可向点火球隙的针极送去一个合适的脉冲电压, 使球间隙点火击穿)。启动点火装置使点火球隙  $F_1$  击穿,  $a$  点电位由零迅速升高到  $U'_0$ ,  $b$  点电位则由原来  $U'_0$  迅速升高到  $2U'_0$ 。当  $a$  点的电位突然变化时, 经过  $R'_2$  也会对  $d$  点的对地杂散电容  $C_e$  充电, 因  $R'_2$  较大, 对  $C_e$  的充电需要一定的时间, 故在  $b$  点的电位达到  $2U'_0$  时,  $d$  点基本上仍保持零电位。这样, 在球隙  $F_2$  上就出现了接近等于  $2U'_0$  的电压, 从而导致  $F_2$  击穿。同理, 其他球隙也相继很快击穿, 结果使原来并联充电到  $U'_0$  的各个主电容串联起来向  $C_2$  放电。放电时的等值电路与图

4-8 (b) 一样, 其中  $U_0 = nU'_0$ ;  $C_1 = C'_1/n$ ;  $R_1 = nR'_1$ ;  $R_2 = nR'_2$ ;  $n$  为冲击电压发生器的级数。电阻  $R$  在充电时起电路的连接作用, 在放电时起隔离作用,  $C'_1$  经  $R$  的放电不应显著影响输出电压波形, 为此要求  $R$  要比  $R'_2$  大得多。

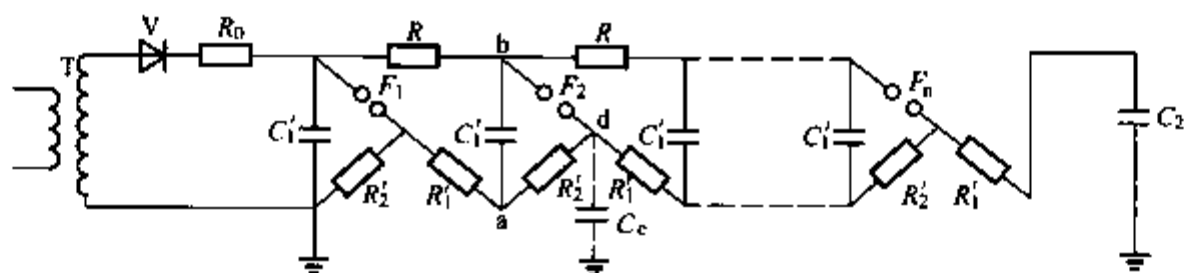


图 4-11 高效率多级冲击电压发生器电路图

## 2. 操作冲击电压的产生

利用冲击电压发生器产生操作冲击电压的原理与产生雷电冲击电压的原理是一样的, 只不过操作冲击电压的波前和半峰值时间比雷电冲击电压的长得多, 所以要求发生器的放电时间常数比产生雷电冲击电压时长得多。增大发生器放电回路中的各种电容 (主电容、波前电容) 和各种电阻 (波前电阻、波尾电阻和隔离电阻), 即可获得满足要求的操作冲击电压波形。

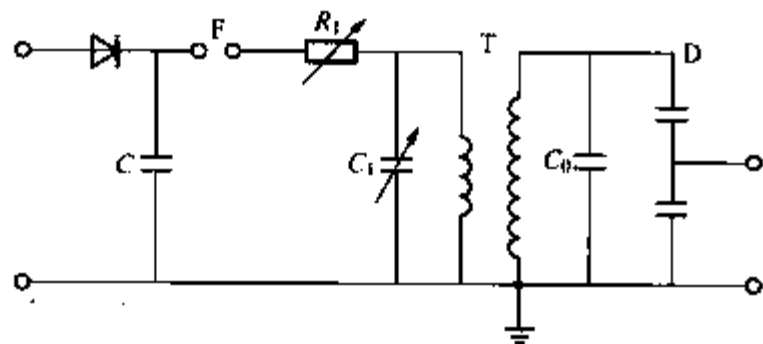


图 4-12 IEC 推荐的一种操作波发生器

操作冲击电压还可以利用冲击电压发生器和变压器联合产生, 即用一个小型的冲击电压发生器向变压器低压绕组放电, 在变压器高压绕组感应出幅值很高的操作冲击电压波。图 4-12 所示为 IEC 推荐的一种操作波发生装置的接线图。具体波形通过调节  $R_1$  和  $C_1$ , 并根据所需试验电压提高充电电压  $U_0$  获得高压操作波。

## 二、冲击高电压的测量

目前常用的测量冲击高电压的装置有球隙、分压器-峰值电压表和分压器-示波器。球隙和分压器-峰值电压表只能测量冲击电压的峰值, 而分压器-示波器不仅能指示峰值, 还能显示冲击电压的波形。

### 1. 用球隙测量

用球隙测量冲击电压时, 除了球隙的有关结构、布置、连接和使用等要符合规定外, 还应注意以下特点。

(1) 由于在冲击电压作用下球隙的放电具有分散性, 球隙测量时所确定的电压应为球隙的 50% 放电电压。调节球隙距离至加上 10 次被测的冲击电压, 能有 4~6 次使球隙击穿, 此时根据球隙距离查表并进行大气条件校正后所得的电压值就是被测冲击电压的峰值。

(2) 球隙放电电压表中的冲击放电电压值是标准雷电冲击全波或长波尾冲击电压下球隙的 50% 放电电压。由于规定测量球隙为稍不均匀电场, 所以操作冲击电压下球隙的放电电压与雷电冲击电压下的相同。又由于球隙的伏秒特性在放电时间大于  $1\mu s$  时几乎是一条直线, 故用球隙实际上可测量波前时间不小于  $1\mu s$ , 半峰值时间不小于  $5\mu s$  的任意冲击全波或波尾截断的截波的峰值。

(3) 在小间隙中为加速有效电子的出现, 使放电电压稳定, 凡所用球径小于 12.5cm, 不论测量何种电压, 或使用任何球径来测量峰值小于 50kV 的任何电压时, 都必须用短波光

源照射球隙。

(4) 测量冲击电压时, 与球隙串联的保护电阻的作用是减小球隙击穿时加在被试品上的截波电压陡度, 同时减小阻尼回路内可能发生的振荡。由于球隙击穿前通过它的电容电流较大, 所以其阻值不能太大, 否则会引起不允许的测量误差。一般要求不超过  $500\Omega$ , 且其本身的电感不超过  $30\mu\text{H}$ 。

## 2. 用分压器测量系统测量

分压器测量系统包括: 从被试品到分压器高压端的高压引线、分压器、连接分压器输出端与示波器的同轴电缆以及示波器。如果只要求测量冲击电压的峰值, 则可用峰值电压表代替示波器。

(1) 测量系统的方波响应。冲击测量系统性能的优劣通常用方波响应来衡量。在测量系统的输入端施加一个单位方波电压时, 在理想的情况下, 输出电压也应该是方波, 只是幅值按分压器的分压比缩小而已。但由于系统的测量误差, 实际的输出并非方波, 而是一个按指数规律平缓上升或衰减振荡的波形。为便于比较, 将输出的电压按分压器稳态时的分压比归算到输入端, 则此时输出端的稳态电压也为 1。归算后的输出电压称为单位方波响应, 指数型和衰减振荡型单位方波响应如图 4-13 所示。

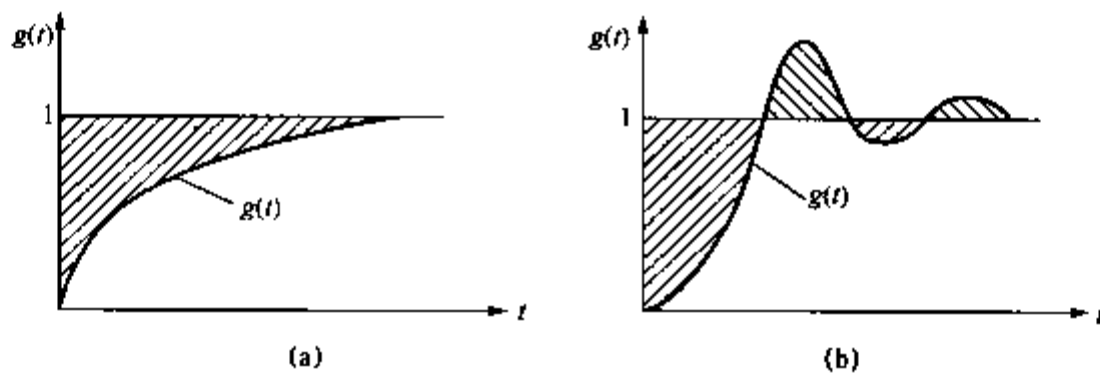


图 4-13 冲击测量系统的方波响应

(a) 指数型; (b) 衰减振荡型

方波响应的重要参数之一是它的响应时间  $T$ 。单位方波和单位方波响应  $g(t)$  之间包围的面积称为方波响应时间, 即

$$T = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt \quad (4-20)$$

响应时间  $T$  的大小反映了测量系统误差的大小。

(2) 冲击分压器。冲击分压器按其结构可分为电阻分压器、电容分压器、串联阻容分压器和并联阻容分压器。各种分压器的原理电路如图 4-14 所示。

电阻分压器高低压臂均为电阻, 为使阻值稳定, 电阻通常用康铜电阻丝等以无感绕法绕制。和测量稳态电压的同种分压器相比, 其阻值要小得多。电阻分压器的误差主要是由于分压器各部分

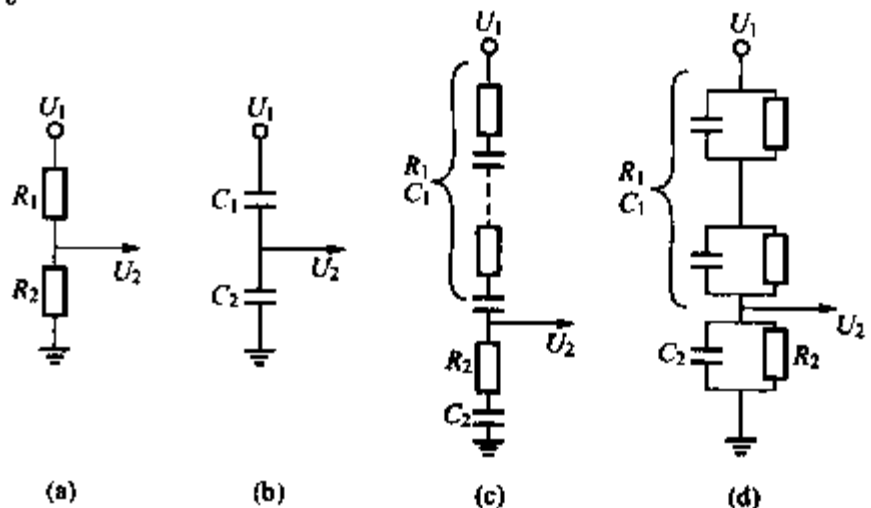


图 4-14 不同类型冲击分压器的原理电路图

(a) 电阻分压器; (b) 电容分压器; (c) 串联阻容分压器;  
(d) 并联阻容分压器

的对地杂散电容引起的, 这些杂散电容对变化速度很快的冲击电压来说, 会形成不可忽略的电纳分支, 而且电纳值与被测电压中各谐波频率有关, 这将使输出波形失真, 并产生幅值误差。电阻分压器在测量 1MV 左右及 1MV 以下的冲击电压时, 采取一定的措施可以达到较高的准确度, 故使用很普遍。

电容分压器高低压臂均为电容, 各部分对地也存在杂散电容, 会在一定程度上影响分压比, 但因分压器本体也是电容, 故只要周围环境不变, 这种影响将是恒定的, 不随被测电压的波形、幅值而变, 因此电容分压器不会使输出波形发生畸变。对分压器进行准确校验, 则幅值误差也可消除。用电容分压器可测量数兆伏的冲击电压。

并联阻容分压器和串联阻容分压器是作为上述两种分压器的改进型而发展起来的。并联阻容分压器在测量快速变化过程时, 沿分压器各点的电压按电容分布, 它像电容分压器, 大大减小了对地杂散电容对电阻分压波形的畸变, 避免了电阻分压器的主要缺点。测慢速变化过程时, 沿分压器各点的电压主要按电阻分布, 它又像电阻分压器, 避免了电容器的泄漏电阻对分压比的影响。如果使高压臂和低压臂的时间常数相等, 则可实现分压比不随频率而变。但这种分压器结构比较复杂, 而且和电容分压器一样, 在电容量较大时会妨碍获得陡波前的波形, 高压引线中需串接阻尼电阻。串联阻容分压器是在各级电容器中串接电阻, 它可以抑制电容分压器本体电容与整个测量回路的电感配合而产生的主回路振荡及分压器本体各级电容器中的寄生电感与对地杂散电容配合形成的寄生振荡, 但串接电阻后将使分压器的响应时间增大, 如果在低压臂中也按比例地串入电阻, 则可保持响应时间不变。串联阻容分压器可以用来测量雷电冲击、操作冲击和交流高电压, 电压可达数兆伏。在串联阻容分压器的基础上, 再加上高值并联电阻, 还可测量直流高电压, 构成所谓的通用分压器, 故串联阻容分压器的应用较为广泛。

(3) 测量冲击电压用的示波器和峰值电压表。冲击电压是变化速度很快的脉冲电压, 要把这样的信号在示波管的荧光屏上清楚地显示出来, 用普通的示波器是做不到的, 因为普通示波器的加速电压一般只有 2~3kV, 其电子射线的能量不够。高压示波器的加速电压可达 20~40kV (热阴极管) 及 20~100kV (冷阴极管), 适合于记录这种快速变化的一次过程。由于高压示波器电子射线的能量很高, 长时间射到荧光屏上会损坏屏上的荧光层, 故电子射线平时是闭锁的, 只有在被测信号到达前的瞬间, 通过启动示波器的释放装置才能射到荧光屏上。被测信号消失后, 电子射线将被自动闭锁。

要显示被测信号的波形, 电子射线除了要按被测信号作垂直偏转外, 还应按时间基轴作水平偏转, 所以示波器的水平偏转板上必须有扫描电压。普通示波器中采用重复的锯齿形扫描, 而高压示波器则采用与被测信号同步触发的可调单次扫描。

为了显示一个完整的冲击电压波形, 首先应启动示波器的释放装置使电子射线到达荧光屏, 其次启动示波器的扫描装置使射线作水平偏转, 然后使被测电压作用到示波器的垂直偏转板上。上述三步动作必须在极短的时间内按所需时间差顺序完成, 这称为示波器的同步。为了确定被测电压的幅值和波形, 一个完整的示波图上, 除应有被测电压的波形外, 还应有零线、校幅电压线和时标, 这些都可由示波器本身的电路产生。由于荧光屏上显示的被测电压瞬间即逝, 所以普通的高压示波器上都带有照相装置。将被测信号、零线、校幅电压线分别拍在同一张底片上 (需启动示波器四次), 即可得到完整的示波图。

如果只需要测量冲击电压的峰值, 可以使用冲击峰值电压表代替示波器, 这种电压表的

原理是：被测电压上升时，通过整流元件将电容器充电到电压峰值；被测电压下降时，整流元件闭锁，电容上的电压保持不变，由指示仪表稳定指示出来。使用时应注意其输入阻抗和最小波前时间。

### 小 结

交流耐压试验时，试验变压器的容量与被试品的电容量成正比。当需要较高试验电压时，可采用几台试验变压器串接的形式，随着串接台数的增加，装置的利用率减低。直流高压一般通过串接整流电路获得，在进行直流耐压试验时，可以同时测量泄漏电流。冲击电压是由冲击电压发生器产生的，分高效率回路和低效率回路两种，如需要更高的冲击电压，可采用多级冲击电压发生器，其基本工作原理是电容器并联充电、串联放电。

稳态高压的测量方法主要有球隙测量法、静电电压表法和高压分压器法；冲击高压可采用球隙和分压器测量系统进行测量。

### 习 题

4-1 试验变压器有何特点？进行工频交流耐压试验时，对试验变压器的容量有何要求？

4-2 工频高电压主要有哪几种测量方法？用静电电压表进行测量时，测出的是电压的有效值还是最大值？

4-3 什么是冲击电压发生器的利用系数？简述冲击电压发生器的工作原理。

4-4 球隙串联电阻的作用是什么？测量不同波形的电压时对球隙电阻有何不同要求？

## 第五章 线路和绕组中的波过程

电力系统事故绝大多数是绝缘事故，而过电压是使绝缘损坏的主要原因。

超过系统最高运行电压从而对绝缘有危害的电压升高称为过电压 (overvoltage)。根据发生过电压的原因不同，将过电压分为两大类：①外部过电压，它是由于外部因素（雷击）作用于电力系统而引起的过电压；②内部过电压，它是由于电力系统内部在故障或开关操作时发生电磁振荡而引起的过电压。

过电压作用的时间通常很短，但其幅值却大大超过正常工作电压，因而对电力系统的绝缘构成很大的威胁。所以，为了保证电力系统的安全运行，必须研究过电压发生的机理、发展过程、影响因素和限制措施。

本章主要介绍过电压波在线路和绕组上传播的基本规律和计算方法，它是研究过电压的理论基础。

### 第一节 均匀无损单导线线路中的波过程

实际电力系统的线路都属于多导线系统，但为了更清晰地分析波过程的物理本质和基本规律，这里先考虑单导线线路的波过程，同时暂时忽略线路的电阻和电导损耗，假设沿线各处参数相同。

#### 一、波过程的一些基本概念

##### 1. 什么是波过程

从电能生产过程来看，电力系统是由发、变、用电设备经各类输配电线路连接而成的统一体；从电路的观点来看，电力系统是由电源和  $R$ 、 $L$ 、 $C$  等元件组合而成的一个复杂电路。由电路理论可知，当线路很长（比如远距离输电线路）或电源频率很高（如在雷电或操作冲击电压作用下）时，此时线路的实际长度与电源波长相当，电路中的元件就不能按集中参数电路来分析，必须按分布参数电路来分析。也就是说，在某一时刻，电路上不同位置的电压电流的数值不相同，电压和电流既是时间的函数也是空间的函数。分布参数电路中的电磁暂态过程属于电磁波的传播过程，我们就把这种传播过程简称为波过程。

##### 2. 波是怎样沿着线路传播的

现在我们从图 5-1 所示的均匀单根无穷长无损线开始分析。将传输线设想为由无数个

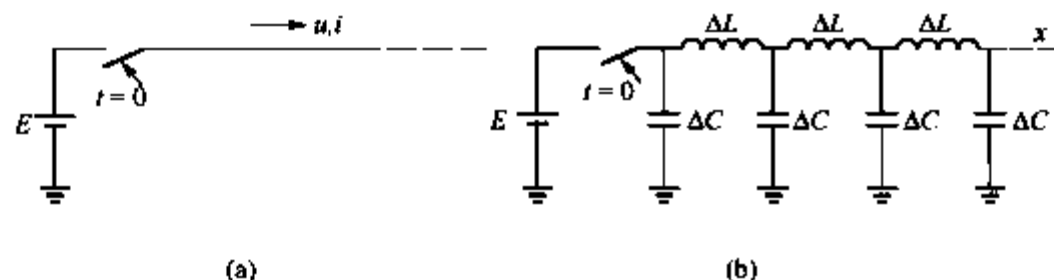


图 5-1 均匀无损单导线线路  
(a) 线路图；(b) 等效电路

很小的长度单元  $\Delta x$  构成，设单位长度线路的电感和对地电容分别为  $L_0$  和  $C_0$ 。

设  $t=0$  时线路首端合闸于直流电压源  $E$ 。 $t=0$  以后，近处的电容立即充电；而远处的电容由于电感的存在需

隔一段时间才能充上电,并向更远处的电容放电。即为一个电压波以一定速度沿  $x$  方向传播,在导线周围逐步建立起电场的过程。

在电容的充放电时,将有电流流过导线的电感,所以也有一个电流波同时沿  $x$  方向传播,在导线周围逐步建立起磁场的过程。

实质上,电压波与电流波的流动就是电磁波沿线路的传播过程。这种电压波和电流波以波的形式沿导线传播通常称为行波。

### 3. 波阻抗

假设线路为零状态,在某一时刻  $t$  时,电磁波到达  $x$  点,则长度为  $x$  的导线对地电容为  $C_0 x$ ,此电容充电到  $u$ ,即获得电荷  $C_0 x u$ ,这些电荷是在时间  $t$  内经电流波  $i$  传送过来的,因此

$$C_0 x u = i t \quad (5-1)$$

另一方面,在  $t$  时间内,长度为  $x$  的导线上已建立起电流  $i$ ,电感为  $L_0 x$ ,这些磁链是在  $t$  时间内建立的,导线上的感应电动势为

$$u = \frac{L_0 x i}{t} \quad (5-2)$$

从式 (5-1) 和式 (5-2) 中消去  $t$ ,可以得到同一时刻、同一地点、同一方向电压波与电流波的比值  $Z$  为

$$Z = \frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (5-3)$$

即线路的波阻抗,通常以  $Z$  表示,单位为欧姆 ( $\Omega$ )。

对于单位长度导线的电容和电感为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{2h_d}{r}} \text{ (F/m)} \quad (5-4)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0\mu_r}{2\pi} \ln \frac{2h_d}{r} \text{ (H/m)} \quad (5-5)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \text{ (F/m)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

式中  $\epsilon_0$ ——真空介电常数;

$\epsilon_r$ ——相对介电常数;

$\mu_0$ ——真空导磁系数;

$\mu_r$ ——相对导磁系数;

$h_d$ ——导线对地平均高度;

$r$ ——导线半径。

把  $L_0$ 、 $C_0$  代入式 (5-3), 得

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}} \ln \frac{2h_d}{r} \quad (5-6)$$

可见  $Z$  与导线长度无关。一般架空单导线  $Z \approx 500 \Omega$ , 考虑冲击电晕将使  $C_0$  增大, 此时波阻抗将减小,  $Z \approx 400 \Omega$ 。分裂导线因其等效半径增大,  $C_0$  增大,  $L_0$  减小, 故其

波阻抗减小,  $Z \approx 300\Omega$ 。电缆相对磁导率  $\mu_r = 1$ , 磁通主要分布在电缆芯子和铅包外壳之间, 故  $L_0$  较小, 又因固体介质相对介电常数较空气大, 电缆芯和外皮距离很近, 故  $C_0$  比架空线路大得多。因此电缆的波阻抗比架空线要小得多, 数值通常在几  $\Omega$  到几十  $\Omega$  之间。

应注意的是, 分布参数电路中的波阻抗与集中参数电路中的电阻完全不同, 二者的主要区别在于:

(1) 电磁波通过波阻抗为  $Z$  的无损线时, 其能量以电磁能的形式储存在周围介质中, 而不像通过电阻那样被消耗掉。

(2) 波阻抗  $Z$  的数值只与导线单位长度的电感  $L_0$  和电容  $C_0$  有关, 而与线路长度无关。

#### 4. 波速

从式 (5-1) 和式 (5-2) 中消去  $u$  和  $i$ , 可得行波的传播速度

$$v = \frac{x}{t} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (5-7)$$

把  $L_0$ 、 $C_0$  代入式 (5-7) 得

$$v = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} (\text{m/s}) \quad (5-8)$$

从式 (5-8) 可以看出, 波的传播速度与导线几何尺寸、悬挂高度无关, 而仅由导线周围的介质所确定。

对于架空线路,  $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ , 所以  $v = 3 \times 10^8 (\text{m/s}) = C$  (真空中的光速); 对于电缆,  $\epsilon_r \approx 4$ ,  $\mu_r = 1$ , 所以  $v = 1.5 \times 10^8 (\text{m/s}) \approx 0.5C$ , 约等于光速的一半。

#### 5. 电磁场能量

对波的传播也可以从电磁能量的角度来分析。在单位时间里, 波走过的长度为  $l$ , 在这段导线的电感中流过的电流为  $i$ , 在导线周围建立起磁场, 相应的能量为  $\frac{1}{2}(lL_0)i^2$ 。由于电流对线路电容充电, 使导线获得电位, 故其能量为  $\frac{1}{2}(lC_0)u^2$ 。根据式 (5-3), 可以有  $u = iz$ , 不难证明

$$\frac{1}{2}(lL_0)i^2 = \frac{1}{2}(lC_0)u^2 \quad (5-9)$$

这就是说, 电压、电流沿导线的传播的过程, 就是电磁场能量沿导线传播的过程, 而且导线在单位时间内获得的电场能量和磁场能量相等。

### 二、波过程的基本规律

为了求出单根无损导线上行波的传播规律 (即数学表达式), 对图 5-1 所示的分布参数电路可以采用电路理论中的 KVL、KCL 列出两方程式, 再经过数学推导整理后, 可得到如下的方程,

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases} \quad (5-10)$$

此方程即为均匀无损单导线的波动方程。

利用电路理论中的运算微积分法（解析法）求解该方程，得到

$$\begin{cases} u(x, t) = u_q\left(t - \frac{x}{v}\right) + u_f\left(t + \frac{x}{v}\right) \\ i(x, t) = i_q\left(t - \frac{x}{v}\right) + i_f\left(t + \frac{x}{v}\right) \end{cases} \quad (5-11)$$

式（5-11）就是均匀无损单导线线路波动方程的解。其中  $v$  就是波的传播速度。

事实表明，采用上述的解析法可以求解简单分布参数电路的暂态过程，但是对于工程上遇到的实际电路，采用解析法很难求出。有鉴于此，下面重点介绍一种更为实用的分析方法——行波法（基于解析法）。应该指出的是，行波法还是利用计算机数值求解波过程的基础。

首先对式（5-11）中电压  $u$  的第一个分量  $u_q\left(t - \frac{x}{v}\right)$  进行讨论。设任意波形的电压波  $u_q\left(t - \frac{x}{v}\right)$  沿线路  $x$  传播，如图 5-2 所示。假设当  $t=t_1$  时，线路上任意位置  $x_1$  点的电压值为  $u_a$ ，当  $t=t_2$  时（ $t_2 > t_1$ ），电压值为  $u_a$  的点到达  $x_2$ ，则  $x_2$  应满足

$$t_1 - \frac{x_1}{v} = t_2 - \frac{x_2}{v}$$

即

$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1)$$

显然， $u_q\left(t - \frac{x}{v}\right)$  可视为沿  $x$  正方向行进的电压波，称为前行电压波。同样地，可以证明  $u_f\left(t + \frac{x}{v}\right)$  可视为沿  $x$  反方向行进的电压波，称为反行电压波， $i_q\left(t - \frac{x}{v}\right)$  与  $i_f\left(t + \frac{x}{v}\right)$  亦然。

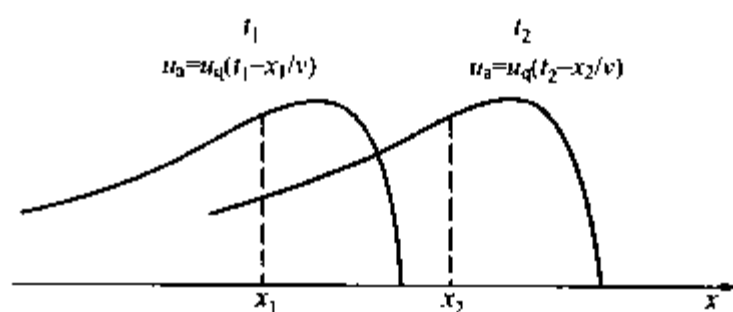


图 5-2 行波运动

这样一来，我们就可以利用行波的概念得出波动方程解的物理意义如下：线路上传播的任意波形的电压与电流，可分解成向前传播的前行波与反方向传播的反行波的叠加。或者说，线路上某点某时刻的电压（或电流）为通过该点的前行电压波（电流波）与反行电压波（电流波）的代数和。

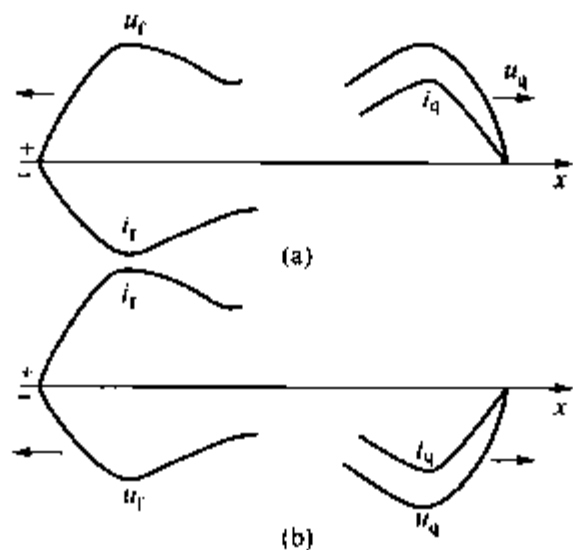


图 5-3 电压波与电流波的符号关系  
(a) 正电荷；(b) 负电荷

电压波正负号只决定于导线对地电容上相应电荷的正负，与运动方向无关。电流波的正负号不但与相应电荷的正负有关，而且与运动方向有关。我们一般以  $x$  正方向作为电流的正方向，如图 5-3 所示。于是在此规定下，前行波电压及其伴随的前行波电流总是同号，而反行波电压及其伴随的反行波电流总是异号，即

$$\begin{cases} \frac{u_q(x, t)}{i_q(x, t)} = Z \\ \frac{u_f(x, t)}{i_f(x, t)} = -Z \end{cases} \quad (5-12)$$

综上所述，我们就可写出如下四个方程式（为方便起见，均略去自变量  $x$  与  $t$ ，下同）

$$\begin{cases} u = u_q + u_f \\ i = i_q + i_f \\ u_q = i_q Z \\ u_f = -i_f Z \end{cases} \quad (5-13)$$

式 (5-13) 这就是反映均匀单根无损导线波过程基本规律的四个基本方程式。从这些基本方程式出发, 再加上初始条件和边界条件, 就可以计算线路上任一时刻、任一点的电压或电流了。

## 第二节 波的折射与反射

实际上, 电力系统中无限长的线路是不存在的, 经常会遇到诸如架空线路和电力电缆相连接之类的情况。由于架空线路的波阻抗与电力电缆波阻抗不同, 因而两者的连接点 (简称“节点”) 实际上是两个不同波阻抗值的分界点。当行波沿架空线路传播到节点时, 会产生一个电磁波能量重新分配的过程, 即在节点处产生行波的折射和反射。

### 一、折射波、反射波的计算

如图 5-4 所示, 两段波阻抗分别为  $Z_1$  和  $Z_2$  的线路相连, 其节点为 A。当有一电压波  $u_{1q}$  沿波阻抗为  $Z_1$  的导线向节点 A 运动时, 我们称电压波  $u_{1q}$  为入射波。从节点 A 反方向运动的电压波  $u_{1f}$  称为反射波。反射波是由入射波反射所产生的。由于入射波  $u_{1q}$  的折射作用, 将有一个前行电压波  $u_{2q}$  传到波阻抗为  $Z_2$  的导线上, 我们称该波为折射波。如果  $Z_2$  线路为有限长, 该折射波又将会在其线路的末端再次发生反射。为了便于讨论波在 A 点发生反射与折射的规律, 这里假设尚无反射波沿  $Z_2$  线路传播到节点 A。

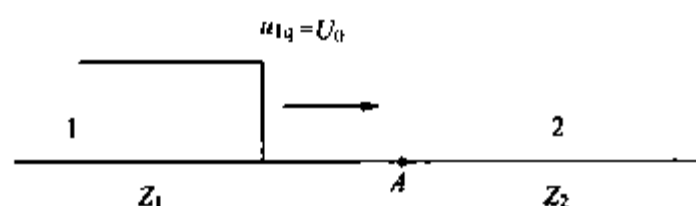


图 5-4 行波在节点的折射与反射

可以运用上一节介绍过的波传播的基本规律和节点的边界条件来计算折射波和反射波。即利用波传播的基本规律 [式 (5-13)] 分别在  $Z_1$  线路和  $Z_2$  线路上建立相应的独立方程, 由于在节点 A 处只能有一个电压值和一个电流值, 据此又可建立两个独立的方程, 联合求解后可得到

$$u_{2q} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_{1q} = \alpha_u u_{1q} \quad (5-14)$$

$$u_{1f} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_{1q} = \beta_u u_{1q} \quad (5-15)$$

式 (5-14)、式 (5-15) 分别是电压波的折射与反射规律。其中  $\alpha_u$  和  $\beta_u$  分别称为电压波的折射系数和反射系数。

根据电压波与电流波的关系不难得到

$$i_{2q} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_{1q} = \alpha_i i_{1q} \quad (5-16)$$

$$i_{1f} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} i_{1q} = \beta_i i_{1q} \quad (5-17)$$

式 (5-16)、式 (5-17) 分别是电流波的折射与反射规律。其中  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别称为电流波的折射系数和反射系数。

以上波的折射、反射系数也适用于线路末端接有不同集中负载的情况。

下面结合一些典型情况来计算折、反射波，并分析其物理意义。

当末端短路（即  $Z_2=0$ ）时，如图 5-5 所示。此时  $\alpha_u=0$ ， $\beta_u=-1$ ，即电压波为负全反射，使在反射波所到之处的电压下降为零，而电流上升一倍（计算结果已列在图中）。从能量守恒的角度来看，这是由于末端短路接地，末端电压为零，入射波的全部能量转变为磁场能量之故。

当末端开路（即  $Z_2\rightarrow\infty$ ）时，如图 5-6 所示。此时  $\alpha_u=2$ ， $\beta_u=1$ ，即电压波为正全反射，使在反射波所到之处电压上升一倍，而电流下降为零（计算结果已列在图中）。从能量守恒的角度来看，这是由于末端开路时，末端电流为零，入射波的全部能量转变为电场能量之故。

当末端接集中负载  $R$  时，且  $R=Z_1$ ，如图 5-7 所示。此时  $\alpha_u=1$ ， $\beta_u=0$ ，即折射电压等于入射电压，反射电压为零。这表明线路既无反射电压波，也无反射电流波。由  $Z_1$  传输过来的能量全部消耗在  $R$  中，线路  $l$  上电压波及电流波不发生改变，不同之处在于波阻抗  $Z_2$  不消耗能量，而集中负载  $R$  将消耗能量。这种情况称为阻抗匹配。在进行高压测量时，往往需要在电缆末端接一匹配电阻（其值等于电缆波阻抗），以消除波传到电缆末端时的折、反射现象，从而正确地测量来波的波形与幅值。

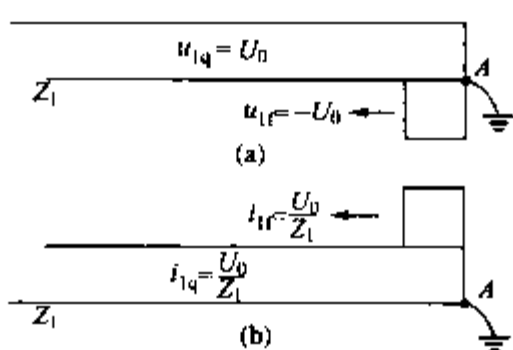


图 5-5 线路末端接地时波的折射和反射  
(a) 电压波；(b) 电流波

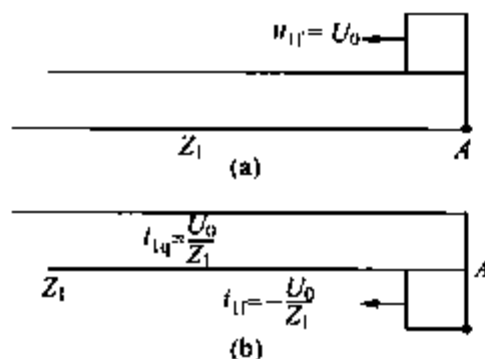


图 5-6 线路末端开路时波的折射和反射  
(a) 电压波；(b) 电流波

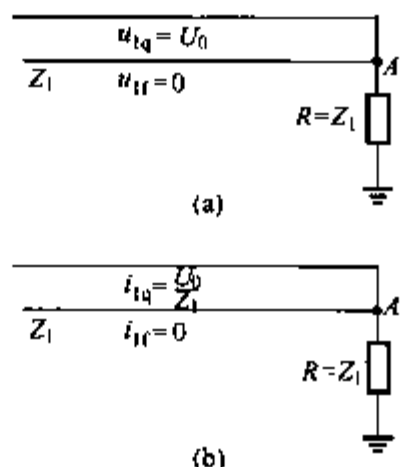


图 5-7 线路末端接负载电阻  $R=Z_1$  时波的折射和反射  
(a) 电压波；(b) 电流波

**【例 5-1】** 直流电源  $E$  在  $t=0$  时合闸于长度为  $l$  的空载线路，如图 5-8 (a) 所示，求线路末端  $B$  点的电压波形。

**解** 设  $\tau$  为电磁波通过长度为  $l$  的线路时所需的时间。

当  $0 < t < \tau$  时，由线路首端发生的第一次电压入射波  $u_{1q} = E$  尚未到达线路末端， $B$  点电压为零。

当  $\tau \leq t < 2\tau$  时，由于线路末端开路，在末端发生正电压全反射，产生第一次反射波  $u_{1f} = E$ ， $u_B = 2E$ 。

当  $2\tau \leq t < 3\tau$  时， $u_{1f}$  到达线路首端，由于首端电源内阻为零，对波的传输来说，相当于发生末端对地短路的情况，从而在首端发生负电压全反射，产生  $u_{2q} = -E$  的第二次电压入射波。但此时  $u_{2q}$  尚未到达  $B$  点，因而仍有  $u_B = 2E$ 。

当  $3\tau \leq t < 5\tau$  时， $u_{2q}$  已到  $B$  点，并产生第二次反射波  $u_{2f} = -E$ ， $u_B = u_{1q} + u_{1f} + u_{2q} + u_{2f} = 0$ 。

当  $5\tau \leq t < 7\tau$  时， $u_{2f} = -E$  到达首端，产生的第三次入射波  $u_{3q} = E$  到达  $B$  点，故在此

时间内  $u_B = 2E$ 。

如此反复下去得到周期为  $4\tau$ ，振幅为  $2E$  的振荡方波，如图 5-8 (b) 所示。

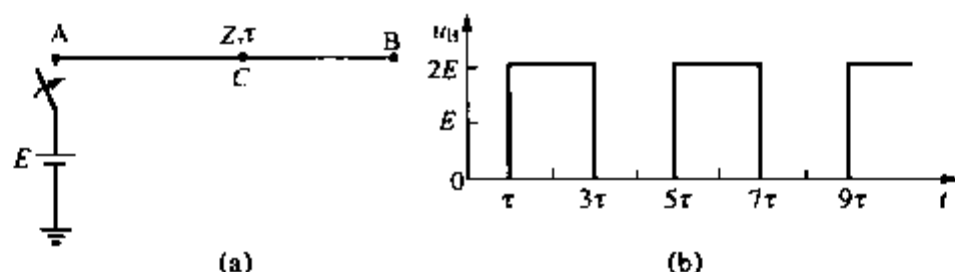


图 5-8 空载线路合闸于电源  $E$

(a) 空载线路合闸示意图; (b) B 点电压波形

## 二、彼德逊法则

利用折反射系数法可以计算一些简单的分布性电路中的波过程。但在实际电力系统中，

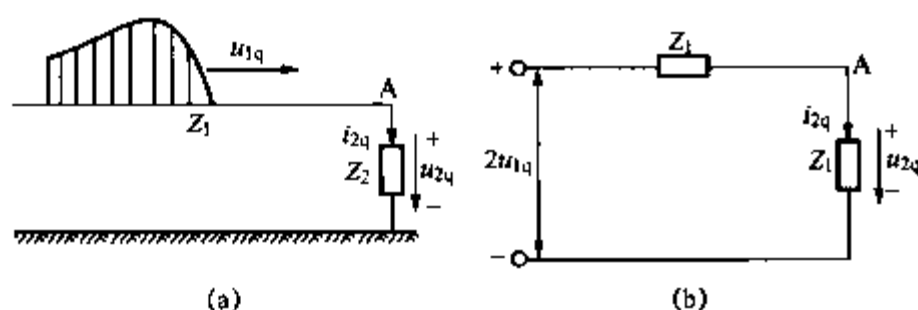


图 5-9 等值集中参数电路

(a) 波袭入节点示意图; (b) 等值集中参数电路

情况往往比较复杂，比如线路接有电感、电容、电阻及其组合，这 will 给波过程的计算带来不便。为了计算复杂的波过程问题，下面介绍彼德逊法则。

如图 5-9 (a) 中，任意波形的前行波  $u_{1q}$  到达 A 点后，来看一下 A 点的电压波形变化情况。前面已经

推导出了折、反射电压和入射电压的关系，现将式 (5-14) 变换为

$$u_{2q} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_{1q} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot 2u_{1q} \quad (5-18)$$

将波阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$  作为集中参数处理后，可画出如图 5-9 (b) 所示的与之对应的等值集中参数电路。等值电路图中把入射电压波  $u_{1q}$  的 2 倍作为等值电压源，入射波所经过的波阻抗  $Z_1$  作为等值集中参数电路的内阻， $Z_2$  作为负载电阻。这就是彼德逊法则。

有了这一等值法则后，就可以把复杂的分布参数电路中的波过程问题简化成集中参数电路的暂态计算问题。其中  $u_{1q}$  可以是任意波形， $Z_2$  可以是任意阻抗。但在使用该法则时，要求满足以下两个条件：①波沿分布参数的线路传入；②波在该节点只有一次折、反射（或理解为反射波尚未回到 A 点以前的时间内）。

下节将通过两个典型例子来介绍彼德逊法则在波过程计算中的应用。

## 第三节 波通过串联电感和并联电容

### 一、波通过并联电容

如图 5-10 (a) 所示的线路中，节点 A 处并联有集中参数元件 C，侵入波为无穷长直角波，试求 A 点的电压。

根据彼德逊法则，画出如图 5-10 (b) 所示的集中参数等值电路。根据电路知识，由“三要素”法不难求得

$$u_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}) = \alpha u_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}) \quad (5-19)$$

式中  $T_C$  ——等值电路的时间常数,  $T_C = \frac{CZ_1Z_2}{Z_1 + Z_2}$ ;

$\alpha$  ——无  $C$  时的折射系数,  $\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 。

由式 (5-19) 可知, 当  $t=0$  时,  $u_A=0$ , 这是由于电容电压不能突变的缘故, 此时电容相当于短路, 随后波的折、反射才以指数规律变化。当  $t \rightarrow \infty$  时, 电容被充电到稳定电压, 充电电流为零, 电容相当于开路, 此时波在 A 点的折、反射电压就与没有电容时的情况一样, 即  $u_A = \alpha u_0$ 。

可见并联电容可起到削弱来波陡度的作用, 通过并联电容后行波的最大陡度为

$$\left. \frac{du_A(t)}{dt} \right|_{\max} = \alpha u_0 \frac{1}{T_C} \Big|_{t=0} = \frac{2u_0}{CZ_1} \quad (5-20)$$

可见,  $C$  值愈大, 折射电压的陡度愈小。

## 二、波通过串联电感

如图 5-11 (a) 所示, 在节点 A 前串联有集中参数元件  $L$ , 侵入波为无穷长直角波, 试求 A 点的电压。

根据彼德逊法则, 可画出如图 5-11 (b) 所示的集中参数等值电路。根据电路知识, 由“三要素”法不难求得

$$u_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_0 (1 - e^{-t/T_L}) = \alpha u_0 (1 - e^{-t/T_L}) \quad (5-21)$$

式中  $T_L$  ——等值电路的时间常数,  $T_L = \frac{L}{Z_1 + Z_2}$ ;

$\alpha$  ——无  $L$  时的折射系数,  $\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 。

由式 (5-21) 可知, 当  $t=0$  时,  $u_A=0$ , 这是因为通过电感的电流不能突变, 电感相当于开路, 即相当于波传到开路的末端形成了正全反射, 通过电感的电流为零, 因此  $u_A=0$ 。当  $t \rightarrow \infty$  时, 由于电流的变化率为 0, 所以电感上的压降也为 0, 相当于电感短路, 此时波在 A 点的折、反射电压就与没有电感时的情况一样。可见, 串联电感可起到削弱来波陡度的作用。通过串联电感后行波的最大陡度为

最大陡度为

$$\left. \frac{du_A(t)}{dt} \right|_{\max} = \alpha u_0 \frac{1}{T_L} \Big|_{t=0} = \frac{2Z_2}{L} u_0 \quad (5-22)$$

可见,  $L$  值愈大, 折射电压的陡度愈小。

由上述两例可知, 侵入波通过并联电容或串联电感后, 均由直角

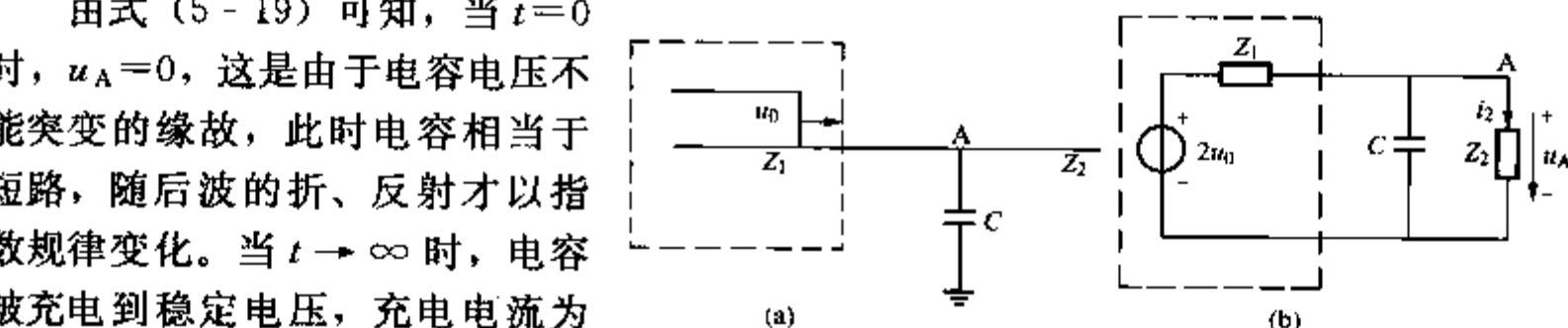


图 5-10 波通过并联电容

(a) 波通过并联电容示意图; (b) 等值集中参数电路

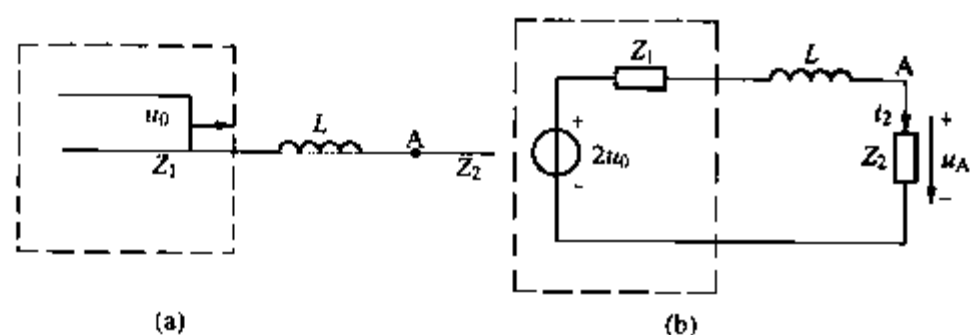


图 5-11 波通过串联电感

(a) 波通过串联电感示意图; (b) 等值集中参数电路

波变成了指数波,波头均被拉长。因此,在防雷保护中常用来限制雷电波的陡度,以保护电机的纵绝缘,只要加大  $C$  或  $L$  的值,即可将侵入波陡度限制在一定的容许范围内。但是由于波刚到电感时会发生电压的正全反射而危及电感首端处的绝缘,况且采用电容较为经济,所以一般都采用并联电容的方法来限制侵入波陡度。

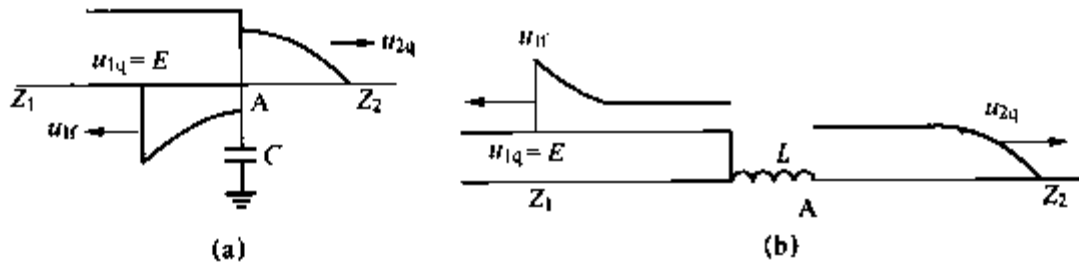


图 5-12 经过电容和电感以后的电压波形

(a) 经过并联电容的电压波形; (b) 经过串联电感的电压波形

直角侵入波旁过电容及穿过电感后的电压波形如图 5-12 (a)、(b) 所示。

掌握了无穷长直角波作用下的波过程后,就可应用丢阿美尔 (Duhamel) 积分计算任意波形电压作用下的波过程。

#### 第四节 波的多次折、反射

在实际电网中,线路的长度总是有限的,例如两段架空导线中间连接一段电缆线或用一段电缆将发电机连接到架空线路上。在这些情况下,波将在两个结点之间发生多次的折、反射现象。

用网格法可以简单清晰地计算波的多次折、反射过程。下面将用网格法来分析波在阻抗不同的串联三导线两节点之间的多次折、反射现象。

如图 5-13 (a) 所示,设无限长直角波电压  $U_0$  自波阻为  $Z_1$  的线路经一段长度为  $l_0$ , 波阻抗为  $Z_0$  的短线向波阻为  $Z_2$  的线路侵入,同时假设线路  $Z_1$ 、 $Z_2$  为由节点无限延伸。波将在两个节点 A、B 之间发生多次的折、反射。

显然两个节点间的折、反射系数分别为

$$\alpha_1 = \frac{2Z_0}{Z_1 + Z_0}, \alpha_2 = \frac{2Z_2}{Z_0 + Z_2},$$

$$\beta_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \beta_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_0 + Z_2}$$

令  $\tau = \frac{l_0}{v_0}$ , 此为行波通过长度为  $l_0$  的中间线路所需的时间。当  $t=0$  时,波传到 A 点,

折射电压  $\alpha_1 U_0$  沿  $Z_0$  向 B 点传播; 当  $t=\tau$  时,  $\alpha_1 U_0$  传到 B 点, 此时 B 点电压即折射电压为  $\alpha_1 \alpha_2 U_0$ , 在 B 点的反射电压  $\alpha_1 \beta_2 U_0$  将返回到 A 点; 当  $t=2\tau$  时, B 点的反射波  $\alpha_1 \beta_2 U_0$  回到 A 点, 在 A 点又发生折、反射, 其反射电压为  $\alpha_1 \beta_1 \beta_2 U_0$ ; 当  $t=3\tau$  时, 反射电压波

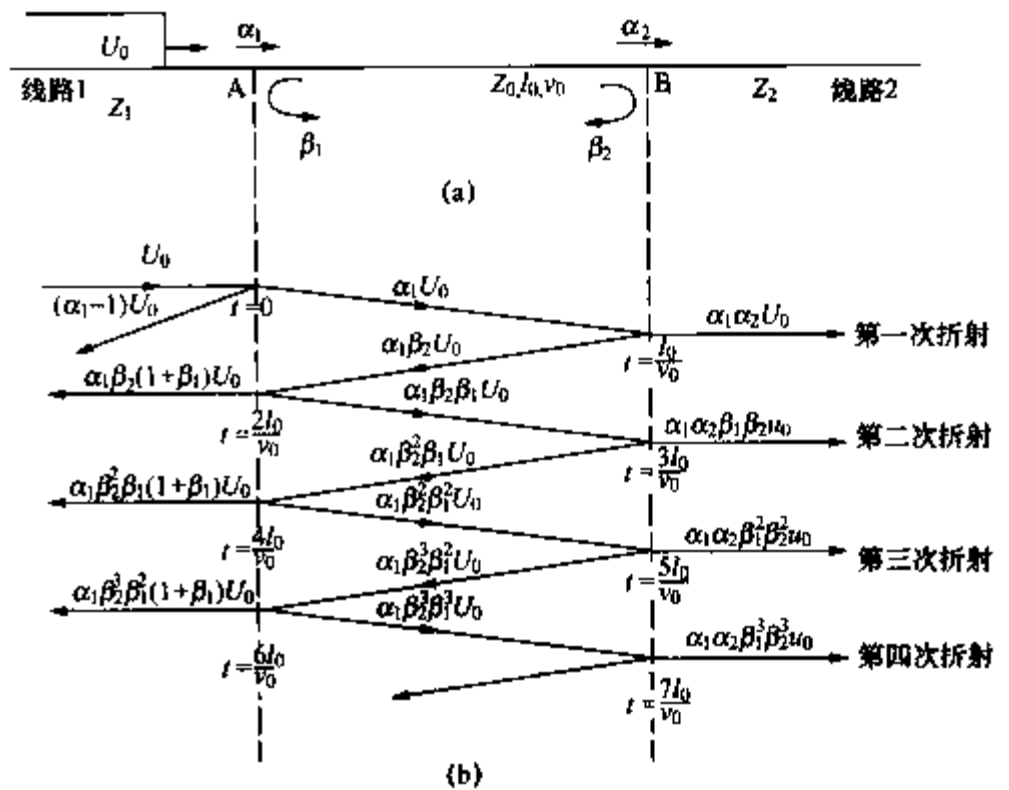


图 5-13 网格法

(a) 接线图; (b) 网格图

$\alpha_1\beta_1\beta_2U_0$  又传到 B 点, 在 B 点又发生折、反射, 如此类推。从图 5-13 (b) 中可以看到, 经过  $n$  次折、反射后, B 点的电压为

$$\begin{aligned} u_B(t) &= \alpha_1\alpha_2U_0 + \alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2U_0 + \alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2U_0 + \cdots + \alpha_1\alpha_2\beta_1^{n-1}\beta_2^{n-1}U_0 \\ &= \alpha_1\alpha_2U_0[1 + \beta_1\beta_2 + (\beta_1\beta_2)^2 + \cdots + (\beta_1\beta_2)^{n-1}] \\ &= \alpha_1\alpha_2U_0 \frac{1 - (\beta_1\beta_2)^n}{1 - \beta_1\beta_2} \end{aligned} \quad (5-23)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时,  $n \rightarrow \infty$ ,  $\because |\beta_1\beta_2| < 1$ ,  $\therefore [(\beta_1\beta_2)^n]_{n \rightarrow \infty} = 0$

于是, B 点的电压为

$$\begin{aligned} u_B &= \alpha_1\alpha_2U_0 \frac{1}{1 - \beta_1\beta_2} \\ &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}U_0 = \alpha U_0 \end{aligned} \quad (5-24)$$

式 (5-24) 中的  $\alpha$  即为波从波阻为  $Z_1$  的线路直接向波阻为  $Z_2$  的线路传播时的折射系数。这说明折射到线路  $Z_2$  的电压最终值只由波阻  $Z_1$  和  $Z_2$  所决定, 而与中间线路的波阻抗  $Z_0$  无关。

串联三导线的中间线路的存在只影响折射波的波头。依据与之串联的另外两导线波阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  参数的不同配合, 其影响的程度是不同的。如果中间线路的波阻抗  $Z_0$  比  $Z_1$  和  $Z_2$  小得多, 那么在近似计算中, 可将中间线路用一个等效并联电容  $C$  来替代, 等值电容  $C = \frac{l_0}{Z_0 v_0}$ ; 反之, 如果  $Z_0$  比  $Z_1$  和  $Z_2$  大得多, 可将中间线路用一个等效串联电感  $L$  来替代, 等

值电感  $L = \frac{l_0 Z_0}{v_0}$ 。而当  $Z_0$  处于  $Z_1$ 、 $Z_2$  之间时, 中间线路的存在将使折射到  $Z_2$  上的电压波发生振荡, 振荡围绕其最终值  $\alpha U_0$  进行, 逐渐衰减。

**【例 5-2】** 长 150m 的电缆两端串联波阻抗为  $400\Omega$  的架空线, 一无限长直角波入侵于架空线  $Z_1$  上, 如图 5-14 所示。已知:  $Z_1 = Z_2$ ,  $Z_0 = 50\Omega$ ,  $U_0 = 500\text{kV}$ , 波在电缆中的传播速度为  $150\text{m}/\mu\text{s}$ , 在架空线中的传播速度为  $300\text{m}/\mu\text{s}$ , 若以波到达 A 点为起算时间, 求:

- (1) 距 B 点 60m 处的 C 点在  $t = 1.5\mu\text{s}$ ,  $t = 3.5\mu\text{s}$  时的电压与电流;
- (2) AB 中点 D 处在  $t = 2\mu\text{s}$  时的电压与电流;
- (3) 时间很长以后, B 点的电压与电流。
- (4) 画出 B 点电压随时间变化曲线。

**解** 画出计算用网格图。如图 5-15 所示。

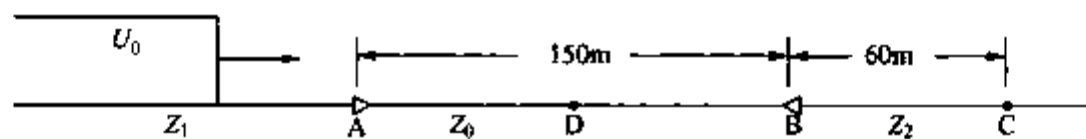


图 5-14 例 5-2 图

波从 A 点传到 B 点的时间

$$t = 150/150 = 1\mu\text{s}$$

波从 B 点传到 C 点的时间

$$t = 60/300 = 0.2\mu\text{s}$$

两节点的电压折、反射系数分别为

$$\alpha_1 = \frac{2Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{2 \times 50}{450} = \frac{2}{9}$$

$$\alpha_2 = \frac{2Z_2}{Z_0 + Z_2} = \frac{2 \times 400}{450} = \frac{16}{9}$$

$$\beta_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{400 - 50}{450} = \frac{7}{9}$$

$$\beta_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_0 + Z_2} = \frac{400 - 50}{450} = \frac{7}{9}$$

(1) 当  $t = 1.5 \mu\text{s}$  时

$$u_C = \alpha_1 \alpha_2 U_0 = \frac{2}{9} \times \frac{16}{9} \times 500 = 197.5 (\text{kV})$$

$$i_C = \frac{u_C}{Z_2} = \frac{197.5}{400} = 0.49 (\text{kA})$$

当  $t = 3.5 \mu\text{s}$  时

$$\begin{aligned} u_C &= \alpha_1 \alpha_2 U_0 + \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 U_0 \\ &= 197.5 + \frac{2 \times 16 \times 7 \times 7}{9 \times 9 \times 9 \times 9} \times 500 \\ &= 317 (\text{kV}) \end{aligned}$$

$$i_C = \frac{u_C}{Z_2} = \frac{317}{400} = 0.79 (\text{kA})$$

(2) 当  $t = 2 \mu\text{s}$  时

$$u_D = \alpha_1 U_0 + \alpha_1 \beta_2 U_0 = \frac{2}{9} \times 500 \times \left(1 + \frac{7}{9}\right) = 197.5 (\text{kV})$$

$$i_D = \frac{\alpha_1 U_0}{Z_0} + \frac{\alpha_1 \beta_2 U_0}{-Z_0} = \frac{\frac{2}{9} \times 500}{50} \times \left(1 - \frac{7}{9}\right) = 0.49 (\text{kA})$$

(3) 当  $t \rightarrow \infty$  时

$$u_B = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_0 = \frac{2 \times 400}{800} \times 500 = 500 (\text{kV})$$

$$i_B = \frac{u_B}{Z_2} = \frac{500}{400} = 1.25 (\text{kA})$$

(4) B点电压随时间变化曲线如图 5-16 所示。

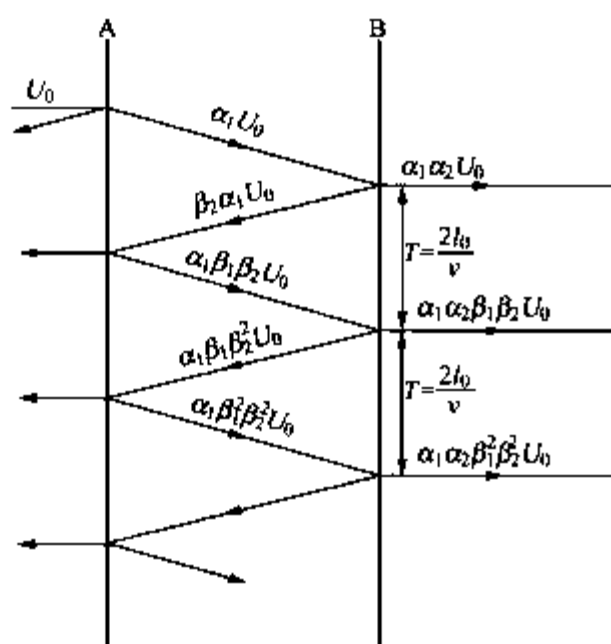


图 5-15 网格图

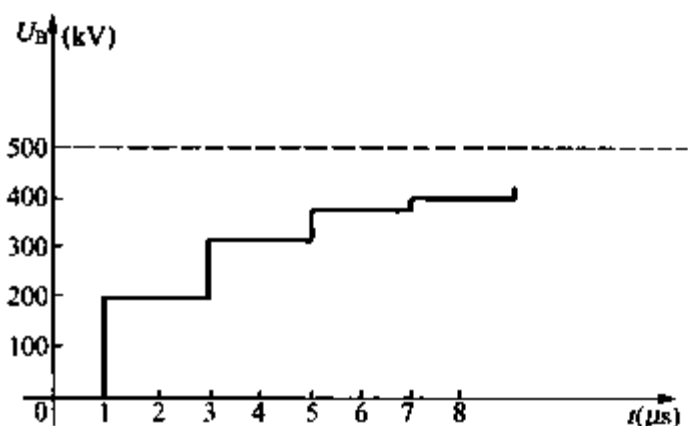


图 5-16 B点电压变化曲线





是输电线路防雷中的一个重要参数。

导线 2 获得了与  $u_1$  同极性的对地电压  $u_2$ ，这样导线之间的电位差  $\Delta u$  为

$$\Delta u = u_1 - u_2 = \left(1 - \frac{Z_{21}}{Z_{11}}\right) u_1 = (1 - K_{12}) u_1 \quad (5-36)$$

分析式 (5-36) 可知，当计及耦合系数时，绝缘子串上承受的电压较无耦合系数时为小。显然，耦合系数越大，越有利于绝缘子的安全运行。在多雷地区，为了减少绝缘子串上的电压，有时在导线下面架设耦合地线，以增大耦合系数。

#### 【例 5-4】 电缆芯与电缆外皮的耦合关系。

假设电缆芯与电缆外皮在始端发生相连（比如保护电缆头的避雷器动作后），有一电压波  $u$  自始端传入，电缆芯的电流波为  $i_1$ ，沿电缆外皮中的电流波为  $i_2$ ，如图 5-19 所示。缆芯与缆皮呈二平行导线系统，由于  $i_2$  产生的磁通完全与缆芯相匝链，电缆外皮上的电位将全部传到缆芯上，故缆皮的自波阻抗  $Z_{22}$  等于缆皮与缆芯间的互波阻抗  $Z_{12}$ ，即  $Z_{22} = Z_{12}$ ，缆芯中的电流  $i_1$  产生的磁通仅部分与缆皮相匝链，故缆芯的自波阻抗  $Z_{11}$  大于缆芯与缆皮间的互波阻抗  $Z_{12}$ ，即  $Z_{11} > Z_{12}$ 。

解 可列出下列方程

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 \\ u_2 = Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2 \end{cases}$$

由于  $u_1 = u_2$ ，故有

$$Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 = Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2$$

但因  $Z_{22} = Z_{12}$ ，而  $Z_{11} > Z_{12} = Z_{21}$ ，故在此条件下仍要满足上述等式，则  $i_1$  必须为零，即沿缆芯应无电流流过，全部电流波被“驱赶”到电缆外皮中去了。其物理含义为：当电流在缆皮上传播时，缆芯上就被感应出与电缆外皮电压（即入侵波）相等的电动势，阻止了缆芯中电流的流通，此现象与导线中的趋肤效应相似，此效应在直配发电机的防雷保护中得到了广泛的应用。

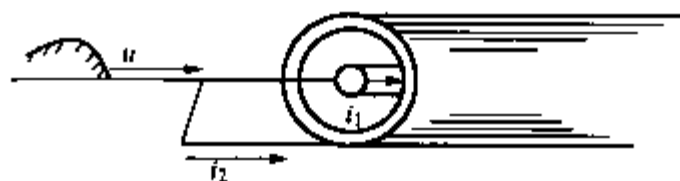


图 5-19 行波沿缆芯缆皮传播

## 第六节 波的衰减与变形

在前面的讨论中，我们均忽略了线路电阻和线路的对地泄漏电导，也不考虑大地电阻和冲击电晕的影响。而实际上这些影响因素都是客观存在的，因此波在线路上传播时总会发生不同程度的衰减与变形。下面逐一分析之。

### 一、导线电阻和泄漏电导的影响

考虑导线电阻  $R_0$  和线路对地电导  $G_0$  时的单根有损长线的单元等值电路，如图 5-20 所示。

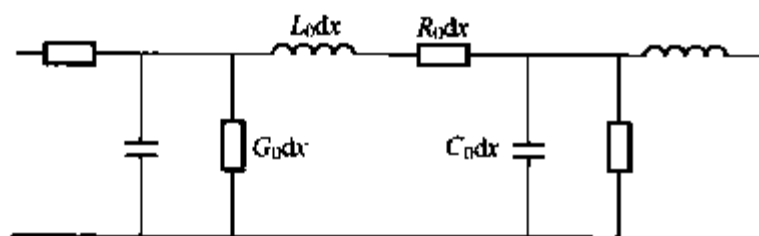


图 5-20 单根有损长线的单元等值电路

显然，导线电阻和对地电导都会消耗能量，因而一般都会引起传输过程中波的衰减与变形（除非  $R_0 C_0 = L_0 G_0$ ，此时电磁波只会衰减而不会变形）。

### 二、大地电阻的影响

在多导线系统中，由于土壤导电性能相对较差，地中电流的等值深度远大于静

电晕象深度, 其线序分量和以大地为回路的零序分量的传播速度不同, 引起波的变形。

### 三、冲击电晕的影响

经分析计算表明, 导线电阻、导线泄漏电导及大地电阻等对波过程的影响相对较小。而强烈的冲击电晕是造成波衰减与变形的重要原因。冲击电晕对导线波过程的影响主要表现在以下三个方面。

#### 1. 导线的波阻抗和波速减小

当高幅值的冲击电压波作用于导线时, 导线周围局部空气将产生局部放电, 即电晕放电现象。线路发生冲击电晕后, 在导线周围沿导线径向形成导电性的电晕套, 电晕套内充满电荷, 相当于增大了导线的半径, 导线的对地电容也随之增大, 于是线路的波阻抗减小 (约下降 20%~30%), 波速也下降 (约为光速的 0.75 倍)。

#### 2. 使导线的耦合系数增大

导线上出现冲击电晕后, 相当于增大了导线的半径, 因而与其他导线之间的耦合系数也将增大。因电晕效应而增大的耦合系数可按式进行校正

$$K = K_0 \cdot K_1 \quad (5-37)$$

式中  $K_0$  ——导线与避雷线间的几何耦合系数, 决定于导线与避雷线的几何尺寸及其排列方式;

$K_1$  ——电晕效应校正系数, 一般可取为 1.1~1.5。

由于电晕效应使导线之间的耦合系数增大了, 所以, 当雷击塔顶或避雷线档距中间时, 作用在绝缘子上的电位差将减小, 这对线路的防雷是有利的。

#### 3. 使波在传播过程中发生衰减与变形

冲击电晕的强烈程度与电压大小有关, 因而高电压部分行波比低电压部分行波的传播速度要慢一些。如图 5-21 所示, 曲线 1 表示原始波形, 曲线 2 表示行波传播距离  $l$  后的波形, 从图可以看到当电压高于电晕起始电压  $u_k$  后, 波形就开始出现剧烈的畸变。这可以看成是电压高于  $u_k$  的各点由于电晕使线路对地电容增大从而以小于光速的速度向前运动所产生的结果。图中低于  $u_k$  的部分, 由于不发生电晕而仍以光速前进, 图中 A 点由于产生了电晕, 它就以比光速小的速度  $v_k$  前进, 在行经  $l$  距离后它就落后了  $\Delta\tau$  时间而变成图中 A' 点。也就是说冲击电晕不仅消耗了能量, 使得过电压波的幅值衰减, 同时也使行波的波头被拉长了, 即降低了波的陡度。显然,  $\Delta\tau$  与行波传播距离  $l$  有关, 与电压  $u$  有关, 一般可用如下的经验

公式计算

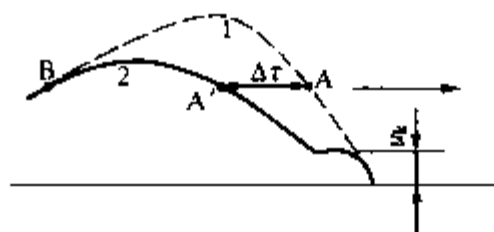


图 5-21 由电晕引起的行波衰减和变形

$$\Delta\tau = \left(0.5 + \frac{0.008u}{h}\right)l(\mu s) \quad (5-38)$$

式中  $l$  ——行波的传播距离, km;

$u$  ——行波的电压幅值, kV;

$h$  ——导线的平均悬挂高度, m。

利用冲击电晕会使行波衰减和变形的特性, 可设置进线

保护段作为变电所防雷的一个重要保护措施 (见第八章第三节)。

## 第七节 绕组中的波过程

过电压波可以从一条线路传播到相连的另一条线路, 也可以从线路传播到变压器、旋转

电机等重要电气设备。变压器、发电机绕组的结构很复杂，而且绕组参数也是非线性的，所以其波过程要比线路复杂得多，完全依靠理论分析尚难以达到要求。为了求在不同波形的冲击电压作用下绕组各点的电压分布规律，多借助于瞬变分析仪、实体模型试验或计算机仿真来求解。尽管如此，通过简化的网络模型进行研究，从而找出变压器、发电机绕组中波过程的基本规律，还是很有必要的。

在冲击波作用下，变压器绕组内部将出现复杂的电磁暂态过程，使其主绝缘（绕组对地、绕组之间）和纵绝缘（绕组的匝间、层间或线饼间）上可能受到很高的过电压而损坏。这主要是由绕组内部的电磁振荡过程和绕组之间的静电感应、电磁感应过程所引起。

### 一、单相变压器绕组中的波过程

由于单绕组变压器的波过程比较简单，物理概念清晰，故可作为定性分析各种实际变压器波过程的基础。

为了简化计算，找到波在绕组中的基本规律，作以下几点假设：

- 1) 略去次级绕组的影响；
- 2) 绕组的结构是均匀的；
- 3) 略去匝间的互感及绕组的损耗（即代表铜耗和铁耗的等效电阻以及代表绝缘损耗的泄漏电导）。

由以上假设可以得到如图 5-22 所示的变压器绕组的等值电路。其中  $L_0$ 、 $K_0$ 、 $C_0$  分别表示绕组单位长度的电感、纵向电容和对地电容。 $l$  是绕组的长度， $S$  为表示绕组末端接地与否的开关。

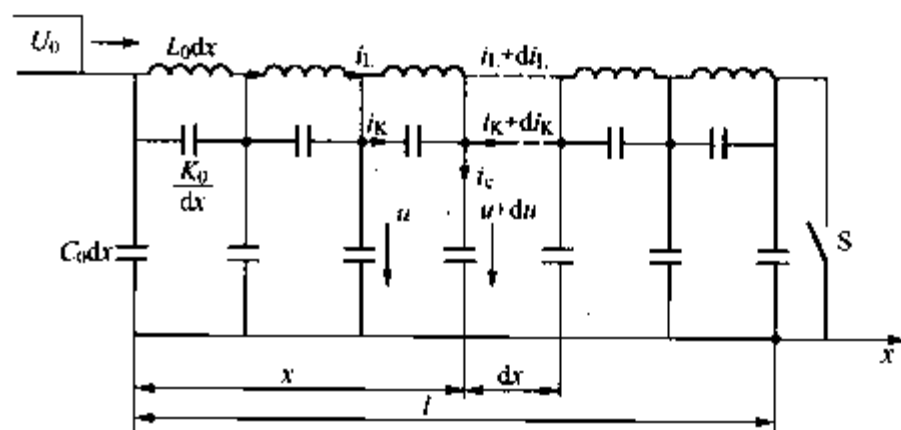


图 5-22 变压器绕组的等值电路

冲击波作用于  $L$ - $C$ - $K$  分布参数电路的过渡过程非常复杂，为了便于掌握绕组波过程的物理概念，我们假设作用于变压器绕组的是一无穷长直角波，电压分布按时间区分为三个阶段：

- ① 直角波开始作用瞬间的起始电压分布（即  $t=0$ ）；
- ② 无穷长直角波长期作用时的稳态电压分布（即  $t \rightarrow \infty$ ）；
- ③ 由起始阶段向稳态过渡时的振荡阶段（即  $t=0$  起到时间趋向无穷大阶段）。

#### 1. 起始电压分布

当直流电压  $U_0$  突然合闸于如图 5-22 所示的等值电路时，由于电感中电流不能突变，电感相当于开路，则该等值电路可进一步简化为如图 5-23 (a) 所示的等值电路。图中绕组的总长度为  $l$ ，绕组末端  $S$  表示接地开关。设在距绕组首端为  $x$  处的电压为  $u$ ， $dx$  长度上的纵向电容为  $\frac{K_0}{dx}$ ，其两端电压为  $du$ ，如图 5-23 (b) 所示，则其上所充电荷为

$$Q = \frac{K_0}{dx} du \quad (5-39)$$

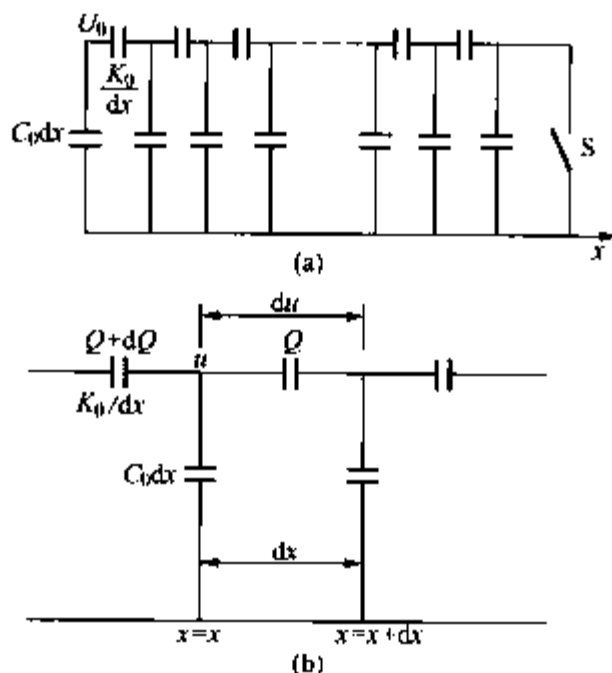


图 5-23 决定绕组电压初始分布的等值电路

(a) 等值电路；(b) 计算用等值电路

求导可得

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{1}{K_0} \frac{dQ}{dx} \quad (5-40)$$

在  $dx$  长度对地电容  $C_0 dx$  上的电荷为

$$dQ = u C_0 dx \quad (5-41)$$

即

$$\frac{dQ}{dx} = C_0 u \quad (5-42)$$

由式 (5-40)、式 (5-42) 经合并化简后得

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{C_0}{K_0} u = 0 \quad (5-43)$$

其通解为

$$u = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} \quad (5-44)$$

再根据边界条件就可求出绕组的起始电压分布。边界条件分绕组末端接地 ( $x=0$  时,  $u=U_0$ ;  $x=l$  时,  $u=0$ ) 与末端不接地 ( $x=0$  时,  $u=U_0$ ;  $x=l$  时,  $i=0$ ) 两种情况, 分别代入求得待定系数  $A$ 、 $B$ , 经过简化处理后, 可以得到如下的结论: 不论绕组末端接地与否, 绕组的起始电压分布均可用下式近似计算

$$u \approx U_0 e^{-\alpha x} \quad (5-45)$$

其中

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_0}{K_0}} \quad (5-46)$$

$\alpha$  称为变压器绕组的空间系数, 它是表征变压器冲击波特性的一个重要指标。

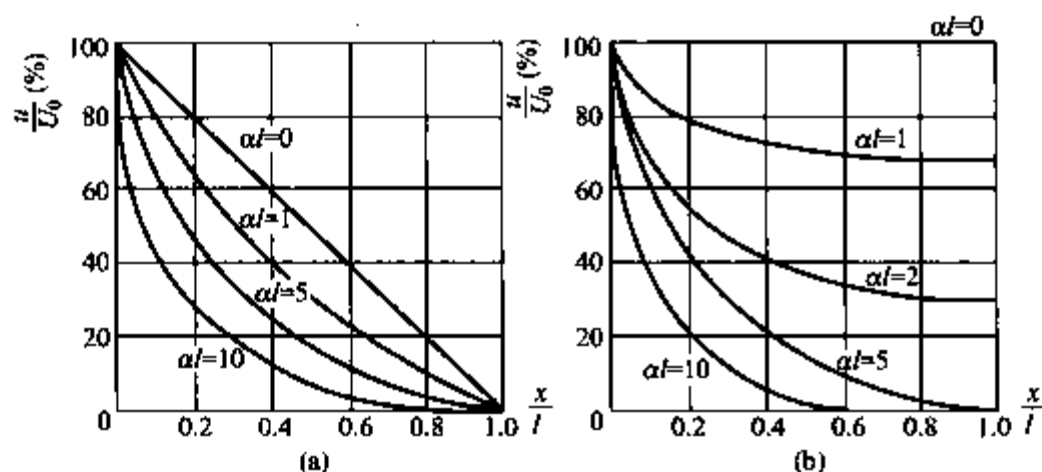


图 5-24 在不同的  $\alpha l$  值下, 绕组初始电压分布

(a) 绕组末端接地; (b) 绕组末端不接地

图 5-24 所示为在不同  $\alpha l$  时绕组末端接地与末端不接地时的起始电压分布曲线。可见, 绕组中的起始电压分布是很不均匀的, 其不均匀程度与  $\alpha l$  值有关,  $\alpha l$  值愈大, 起始电压分布愈不均匀。

$$\text{把 } \alpha l \text{ 改写成 } \alpha l = \sqrt{\frac{C_0 l}{K_0}},$$

可见绕组中的起始电压分布

取决于全部对地电容  $C_0 l$  与全部纵向电容  $\frac{K_0}{l}$  的相对比值。同时看到, 较大部分电压降落在绕组首端附近, 并且在  $x=0$  处电位梯度  $\frac{du}{dx}$  最大。

由式 (5-45) 可求得最大电位梯度为

$$\left. \frac{du}{dx} \right|_{\max} = \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=0} = \alpha U_0 = \frac{U_0}{l} \alpha l \quad (5-47)$$

式中,  $\frac{U_0}{l}$  为绕组的平均电位梯度。式 (5-47) 表明,  $t=0$  瞬间, 绕组首端的电位梯度将是

平均电位梯度的  $\alpha l$  倍。一般连续式绕组  $\alpha l \approx 5 \sim 15$ 。

试验表明, 变压器绕组中的电磁振荡过程在  $10\mu\text{s}$  以内尚未发展起来, 在这期间, 变压器绕组电感中电流很小, 可以忽略, 这样绕组电位分布仍与起始电压分布相近。因此在雷电冲击波作用下分析变电所防雷保护时, 变压器对波过程的影响可以用一等效的集中电容  $C_T$  来替代, 称为变压器的入口电容。由式 (5-47) 可得

$$\begin{aligned} C_T &= \frac{Q_{x=0}}{U_0} \approx \frac{1}{U_0} K_0 \left( \frac{du}{dx} \right)_{x=0} = \frac{1}{U_0} K_0 U_0 \alpha \\ &= K_0 \alpha = \sqrt{C_0 l \cdot \frac{K_0}{l}} = \sqrt{CK} \end{aligned} \quad (5-48)$$

可见, 变压器入口电容是绕组全部对地电容与全部匝间电容的几何平均值。它随变压器的额定电压和容量增大而增大, 一般在  $500 \sim 6000\text{pF}$  范围内。

## 2. 稳态电压分布

### ① 绕组末端接地

当  $t \rightarrow \infty$  时, 电流变化率为零, 电感  $L_0$  相当于短路, 而  $K_0$ 、 $C_0$  已充满电荷, 其支路相当于开路。所以绕组的稳态电压将按绕组电阻分配, 由于绕组电阻是均匀的, 所以其稳态电压分布也是均匀的, 如图 5-25 (a) 曲线 2 所示。其电压分布可表示为

$$u_\infty = U_0 \left( 1 - \frac{x}{l} \right) \quad (5-49)$$

### ② 绕组末端开路

当  $t \rightarrow \infty$  时, 绕组各点的对地电位均为  $U_0$ , 即

$$u_\infty = U_0 \quad (5-50)$$

如图 5-25 (b) 曲线 2 所示。

## 3. 振荡过程中绕组的最大电位分布

由于变压器绕组中的初始电压分布和稳态分布不相同, 因此在过渡过程中必将发生振荡, 振荡的激烈程度和起始分布与稳态分布的差值直接相关。过渡过程中绕组各点的最大对地电压  $u_{\max}$  可按下式定性计算

$$u_{\max} = (u_\infty - u_0) + u_\infty = 2u_\infty - u_0 \quad (5-51)$$

式中,  $u_\infty$ 、 $u_0$  分别表示稳态与起始电压。

显然, 用式 (5-51) 来定性分析绕组中各点的最大电位是比较方便的, 只要将稳态分布与初始分布的差值叠加在稳态分布上, 即可近似描述绕组中各点的最大对地电位, 把各点不同时刻出现的最大对地电位记录下来即成为最大电位包络线, 如图 5-26

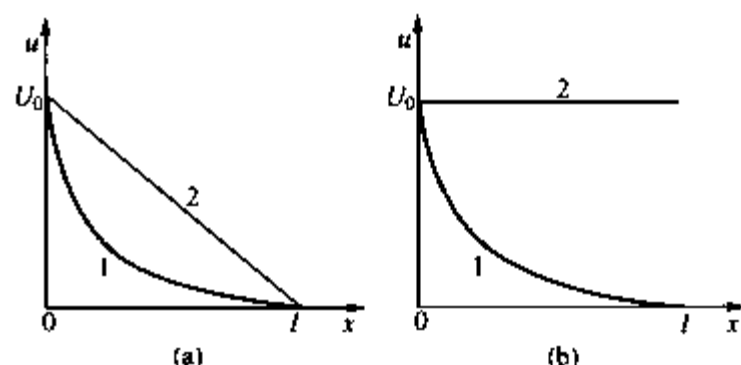


图 5-25 绕组中的电压分布  
(a) 末端接地; (b) 末端开路

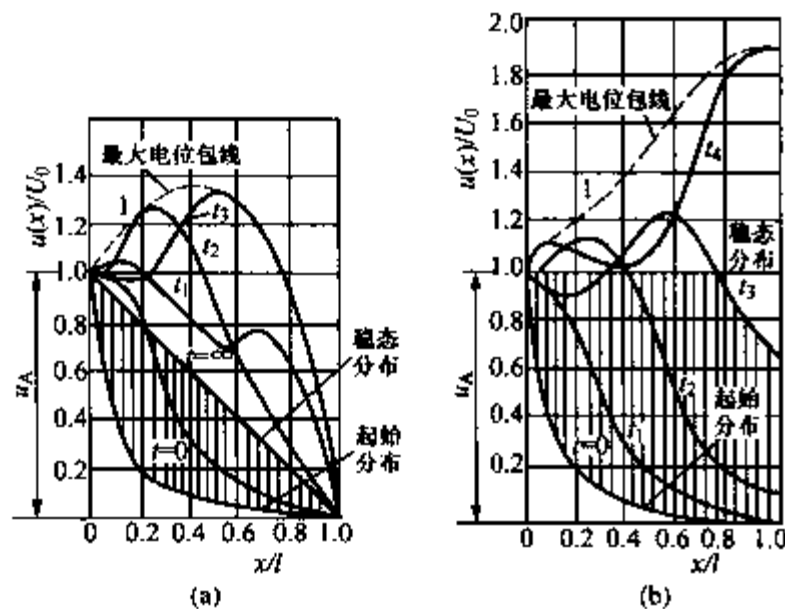


图 5-26 不同时刻绕组各点的电压分布  
(a) 末端接地; (b) 末端开路

所示。

从图 5-26 可知, 对末端接地的绕组, 最大电位将出现在绕组首端附近, 其值将达  $1.4U_0$  左右; 对末端开路的绕组, 最大电位将出现在绕组末端附近, 其值将达  $2U_0$  左右。实际上由于绕组内存在损耗, 最大值将低于上述数值。

进一步的分析可知, 变压器绕组的振荡过程与侵入电压波的陡度有密切的关系。侵入波的陡度愈大, 绕组内的振荡过程将愈激烈。因此, 当有雷电波侵入变电所时, 如果排气式避雷器动作或其他电气设备的绝缘闪络而使侵入波突然截断 (称为截波), 这时变压器的入口电容  $C_T$  与线路的电感便会形成振荡回路, 将在绕组中产生很大的电位梯度而危及绕组的纵绝缘。

## 二、变压器绕组绝缘的内部保护

变压器绕组绝缘的内部保护指的是在变压器内部结构上采取措施, 以减小过电压波引起的电磁振荡过程的危害。内部保护的基本出发点是改善变压器绕组的起始电压分布, 使其起始电压分布尽量接近于稳态电压分布, 从而降低了绕组的对地过电压和最大电位梯度。

由前述可知,  $\alpha l$  值愈小, 绕组起始电压分布愈接近于稳态电压分布。显然, 减小  $C_0$  或增大  $K_0$  均可减小  $\alpha l$  值, 故工程中通常采用横向补偿与纵向补偿两种保护措施。现分述如下。

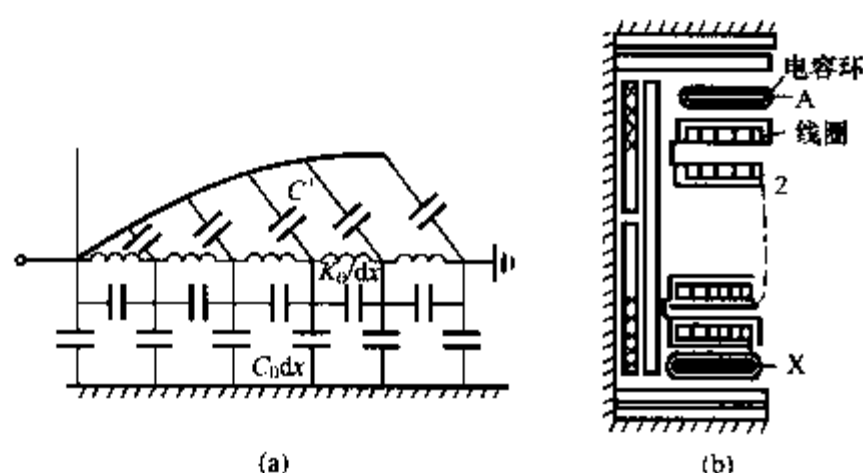


图 5-27 电容环

(a) 电容环示意图; (b) 电容环的布置

减小  $C_0$  的影响。如图 5-27 (a) 所示,  $c'$  为电容环与绕组间的补偿电容。由于对地电容  $C_0 dx$  的分流作用, 使得流经各纵向电容  $K_0/dx$  的电流不相同, 造成绕组首端的电位梯度增大, 加装电容环可以补偿对地电容电流。其布置如图 5-27 (b) 所示, 它是两个开口的金属环, 并与绕组的首端相连。电容环和绕组间的电容电流能补偿该处的对地电容电流, 则通过各纵向电容的电流趋于相同, 从而使

绕组的起始电压分布趋于均匀。这种补偿方式称为横向补偿。

减小  $K_0$  的影响。例如大容量变压器广泛采用纠结式绕组, 可以增大总纵向电容, 如图 5-28 (a) 和 (b) 所示。假定每个线匝电容为  $K$ , 连续式时两个线饼间的纵向电容为  $\frac{K}{8}$ , 而纠结式时达到  $\frac{K}{2}$ 。纠结式绕组的  $\alpha l$  值可下降到 1.5 以下, 从而使线饼电压分布得到很大的改善。

## 三、三相变压器绕组内的波过程

三相变压器绕组内波过程的基本规律与单相绕组相同。依据三相绕组的不同接线方式, 下面分别作介绍。

### 1. 中性点接地的星形接线

当忽略三相绕组间的电磁耦合时, 三个绕组可以看成是独立的、末端接地的单相绕组,

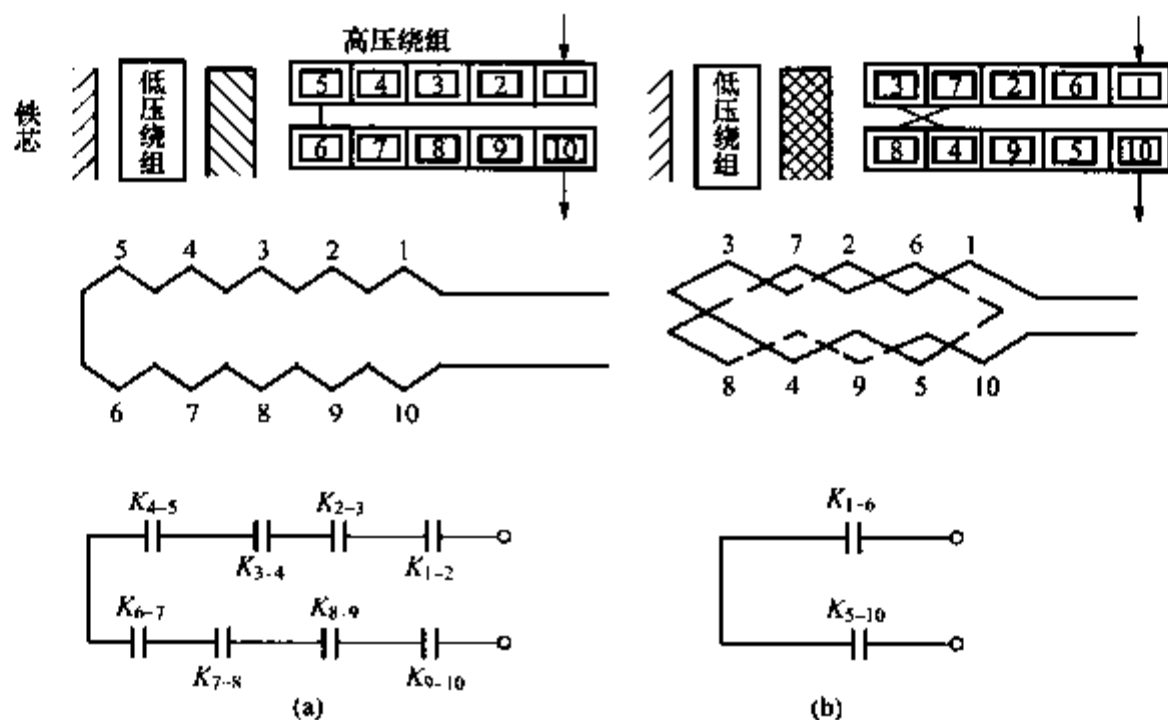


图 5-28 连续式绕组与纠结式绕组的纵向电容

(a) 连续式绕组; (b) 纠结式绕组

不论单相、两相或三相进波，各绕组的电压分布与单相绕组时相同。

### 2. 中性点不接地的星形接线

当单相进波时（假设 A 相进波，如图 5-29 (a) 所示），由于变压器绕组对冲击波的阻抗远大于线路波阻抗，所以在冲击波作用下 B、C 两相绕组的首端可视为接地。绕组的起始和稳态电压分布如图 5-29 (b) 中的曲线 1 和 2 所示。因稳态时绕组电压按电阻分布，故中性点 N 的稳态电位为  $\frac{1}{3} U_0$  ( $U_0$  为 A 相绕组首端进波电压)，在过渡过程中其最大电位为  $\frac{2}{3} U_0$ 。

当两相或三相进波时，可用叠加法来计算绕组中各点的对地电位。不难看出，当两相进波时，中性点 N 的稳态电位可达  $\frac{2}{3} U_0$ ，最大电位可达  $\frac{4}{3} U_0$ ；当三相同时进波时，中性点 N 的稳态电位可达  $U_0$ ，最大电位可达  $2U_0$ ，即为首端进波电压的两倍。

### 3. 三角形接线

当一相进波时，因为变压器绕组对冲击波的阻抗远大于线路波阻抗，故其他两相绕组的端部相当于接地，所以波过程与末端接地的单相绕组相同，不会产生严重的过电压。当两相或三相同时进波时，由变压器绕组两端同时入侵的行波传到绕组中部时，相当于波传到开路的末端一样，会产生很高

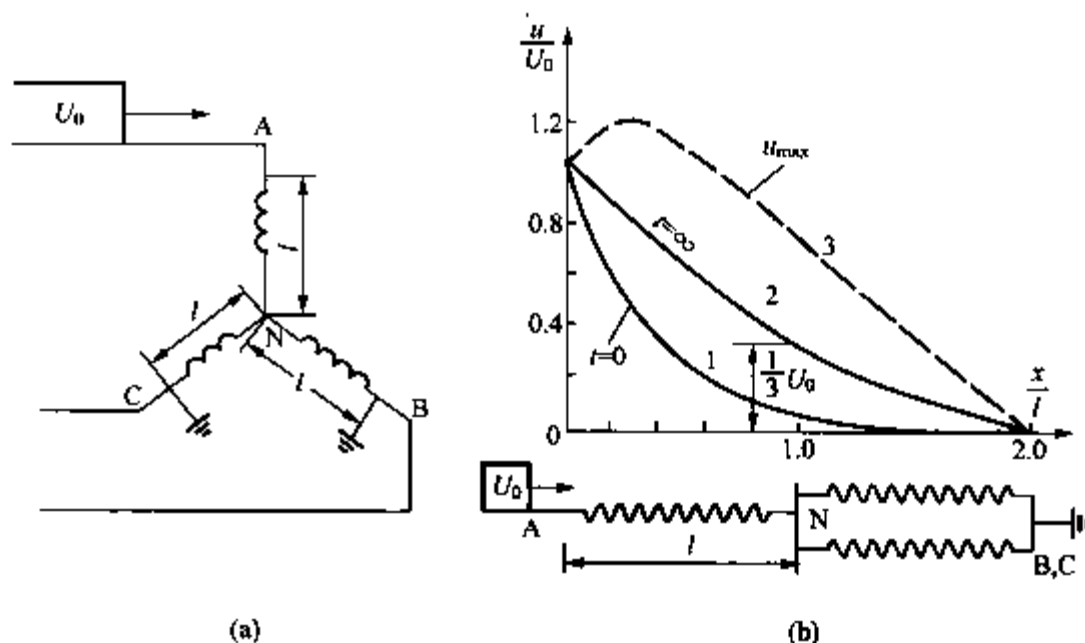


图 5-29 Y 接线方式单相来波

(a) 单相来波示意图; (b) 电位分布曲线

的过电压, 在各相绕组中部对地电位可达  $2U_0$ 。

#### 四、波在变压器绕组间的传播

当冲击电压波入侵于变压器的高压绕组时, 会在低压绕组中产生过电压, 亦称为波的过渡。波由高压绕组向低压绕组传播的途径有两个, 一是通过静电耦合, 二是通过电磁感应。现分别简述如下。

##### 1. 绕组间的静电耦合

当冲击电压开始作用于高压绕组时, 因电感中电流不能突变, 高压与低压绕组的等值电路都是电容链, 且绕组之间又存在电容耦合, 高压与低压绕组上随即都形成了各自的起始电位分布。由图 5-30 所示可知, 若作用于高压绕组首端的电压波幅值为  $U_0$ , 低压绕组上的静电耦合分量  $U_2$  为

$$U_2 = U_0 \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} \quad (5-52)$$

式中  $C_{12}$ ——高低压绕组间的电容;

$C_{20}$ ——低压绕组的对地电容。

一般说来, 低压绕组通常和很多线路或电缆连接, 故  $C_{20}$  远大于  $C_{12}$ , 所以静电耦合分量较小, 一般没有危险。但是, 对于三绕组变压器, 如果高压和中压侧均处于运行状态而低压侧开路, 则电容  $C_{20}$  较小, 当由高压侧或中压侧进波时, 静电耦合分量有可能危及低压绕组的绝缘。

因此, 增大低压侧对地电容 (例如, 低压绕组开路后还接一段电缆) 是降低静电感应过电压的有效措施。另外, 超高压变压器采用在高低压绕组间加入一个接地屏蔽的方法 (如图 5-31), 能有效地减小  $C_{12}$ , 使  $U_2 \approx 0$ 。

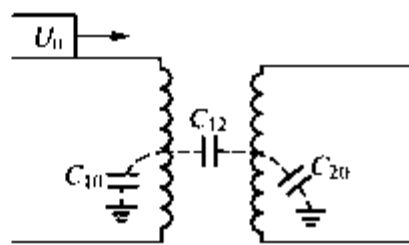


图 5-30 绕组间的静电感应

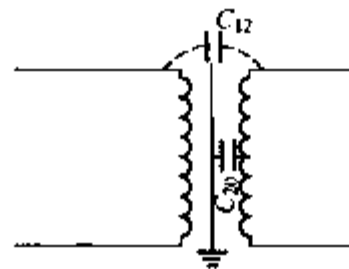


图 5-31 接地屏蔽

##### 2. 绕组间的电磁感应

高压绕组在冲击电压作用下, 绕组电感中会逐渐通过电流, 所产生的磁通将在低压绕组中感应出电压, 这就是电磁感应分量。电磁感应分量与变压器的变比、绕组接线方式和进波相数有关。由于低压绕组的相对冲击强度较高压绕组大得多, 因此凡高压绕组可以耐受的过电压按变比传递到低压绕组时, 对低压绕组也无危害。

#### 五、旋转电机绕组中的波过程

电机绕组中的波过程与变压器的有很大不同, 由于电机绕组是嵌放在各个槽内, 匝间电容  $K_0$  很小, 所以近似计算时可以忽略纵向电容  $K_0$ 。这样, 电机绕组的等值电路就与长线路一样仅由  $L_0$ 、 $C_0$  组成。因此可用一定的波阻和一定的波速来表征旋转电机绕组中波过程的参数, 其波过程的分析与线路的波过程类似。

但是由于电机结构的特殊性, 电机绕组槽内部分和槽外端接部分的  $L_0$ 、 $C_0$  是不一样的, 因此槽内、槽外部分的波阻和波速不一样, 近似计算中, 电机绕组波阻和波速取槽内、

外的平均值。

电机绕组的波阻抗与电机容量、电压等级等因素有关。电机容量愈大，导线的截面积也愈大，每槽匝数减少，使得电容  $C_0$  增大而电感  $L_0$  减小，因而波阻抗减小；额定电压增高，绕组绝缘厚度必然增加，而每槽匝数也将增多，这会使得电容  $C_0$  减小而电感  $L_0$  增加，因而波阻抗增大。

槽外绕组的波速接近于光速。在槽内由于导体与铁心之间介质的介电常数  $\epsilon$  比空气介电常数  $\epsilon_0$  大得多，故其波速（约为  $10 \sim 23 \text{m}/\mu\text{s}$ ）也比光速（ $300 \text{m}/\mu\text{s}$ ）低得多。

若侵入波的陡度为  $a$ ，绕组一匝的长度为  $l$ ，平均波速为  $v$ ，则作用于匝间绝缘上的电压  $u$  为

$$u = a \frac{l}{v} \quad (5-53)$$

由式 (5-53) 可知，匝间电压与入侵波的陡度成正比。陡度很大时，匝间电压可能超过电机匝间绝缘的冲击耐压值，而使绝缘损坏。试验表明，为使一般电机的匝间绝缘不致损坏，应将侵入波的陡度限制在  $5 \text{kV}/\mu\text{s}$  以下。

此外，电机绝缘水平也很低，容易发生三相反击事故，所以一般多用三相波阻。比如三相来波传到星形接线的电机中性点时，该点的电位升高将达首端电压的两倍。因此，直配电机应设法限制来波的陡度，避免损坏中性点绝缘。

## 小 结

导线上某点某时刻的电压（或电流）等于通过该点的前行波电压（或电流）与反行波电压（或电流）的代数和，前行波电压与伴随的前行波电流之比等于  $Z$ ，而反行波电压与伴随的反行波电流之比为  $-Z$ 。

波阻抗  $Z$  与导线的长度无关，其与集中参数电路中的电阻  $R$  性质完全不同，不可混为一谈。利用波的传播规律和边界条件，可以求得波的折射和反射系数。对于三条及以上的线路多次折、反射问题，可利用网格法分析。

利用彼得逊法则可简化某些较为复杂的分布参数电路问题。但应满足两个条件：一是波沿分布参数的线路传入；二是波在该节点只有一次折、反射。

行波穿过串联电感或旁过并联电容时，波头均被拉长，即降低了侵入波的陡度，而对最终的幅值并无影响。通常都采用并联电容的方法来降低侵入波的陡度。

波在平行多导线系统中的传播，除了要考虑线路的自波阻抗外，还要考虑线路之间的互波阻抗。避雷线对导线的“耦合作用”以及电缆外皮的“趋肤效应”为平行多导线系统中波过程的实例。由于线路存在电阻，对地存在泄漏电导，过电压波袭来时还会出现冲击电晕现象，故波在线路上传播时均会出现衰减与变形。

当直角波刚作用于变压器绕组首端时，不论绕组末端接地与否，起始电压分布均为  $u \approx U_0 e^{-\alpha x}$ 。最大电位梯度出现在绕组首端，其大小是绕组平均电位梯度  $\frac{U_0}{l}$  的  $\alpha l$  倍，对变压器首端附近的纵绝缘威胁很大，故变压器内部必须采取保护措施以尽量减小  $\alpha l$  值。在振荡过程中，开路的末端对地电压可能达到 2 倍入侵波电压，末端接地时最大电压出现在首端附

近,幅值约为 1.4 倍入侵波电压,故对变压器的主绝缘威胁较大。

旋转电机绕组的实际波过程很复杂。一般把旋转电机绕组近似看作具有一定波阻和波速的线路来分析其中的波过程。

## 习 题

5-1 变电站母线上接有 A、B、C 三条出线,其波阻抗分别为  $380\Omega$ ,  $400\Omega$ ,  $420\Omega$ ,从线路 C 上传来幅值为  $1000\text{kV}$  的无穷长直角波。求在线路 A 上出现的折射波和线路 C 上的反射波。

5-2 有一  $10\text{kV}$  发电机直接与架空线路连接。当一幅值为  $80\text{kV}$  的无限长直角波沿线路三相同步进入电机时,为了保证电机入口处的冲击电压上升速度不超过  $5\text{kV}/\mu\text{s}$ ,接电容

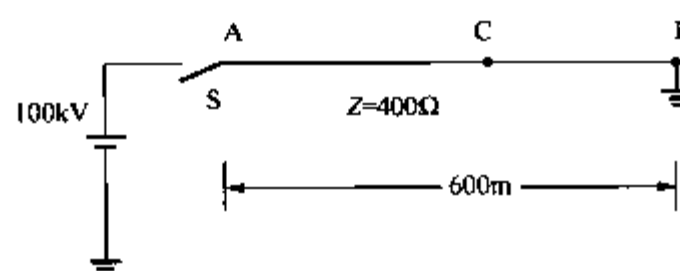


图 5-32 题 5-3 图

进行保护。设线路三相总的波阻抗为  $280\Omega$ ,电机绕组三相总的波阻抗为  $400\Omega$ ,求电容  $C$  值。

5-3 如图 5-32 所示,线路 B 端为短路状态时,试画出线路中点 C 的电压和电流波形。

5-4 有一幅值为  $300\text{kV}$  的无限长直角波沿波阻抗  $Z_1$  为  $400\Omega$  的线路侵入到波阻抗为  $800\Omega$  的发电机上,为保护该发电机匝间绝缘,在发电

机前并联一组电容量  $C$  为  $0.25\mu\text{F}$  的电容器,试求:

(1) 稳定后的入射波电流、反射波电压和电流、折射波电压和电流;

(2) 画出入射波电压和电流、折射波电压和电流、反射波电压和电流随时间的变化曲线;

(3) 并联电容  $C$  的作用何在?

5-5 有一台变压器高压绕组对地的总电容  $C$  为  $1920\text{pF}$ ,总纵向电容  $K$  为  $24\text{pF}$ ,求在  $100\text{kV}$  直角波作用下的起始电位分布曲线。如果绕组共 60 个线段,求在首端线段之间的起始电位梯度与平均电位梯度。

## 第六章 雷电及防雷保护装置

通常将雷电引起的电力系统过电压,称为大气过电压。雷云放电在设备上产生的过电压,是由于雷云的影响而产生的,所以也称作雷电过电压。

大气过电压可分为直击雷过电压和感应雷过电压。雷直接击于电气设备或输电线路时,巨大的雷电流在被击物上流过造成的过电压,称为直击雷过电压;雷击电气设备、输电线路附近的地面或其他物体时,由于电磁感应和静电感应在电气设备或输电线路上的过电压,称为感应雷过电压。

本章将介绍雷电放电的过程,雷电参数及大气过电压的一些防护装置结构和原理。

### 第一节 雷 电 放 电

作用于电力系统的大气过电压是由雷云对地放电所引起的,为了了解大气过电压的产生,必须先了解雷云对地放电的发展过程。

雷云就是积聚了大量电荷的云层。关于雷云带电的机理,迄今为止没有统一的定论。通常认为,在含有饱和水蒸汽的大气中,当遇到强烈的上升气流时,会使空气中水滴带电,这些带电的水滴被气流所驱动,逐渐在云层的某部位集中起来,就形成带电雷云。雷云中的电荷一般不是在云中均匀分布的,而是集中在几个带电中心。测量数据表明,雷云的上部带正电荷,下部带负电荷。正电荷云层分布在大约  $4\sim 10\text{km}$  的高度,负电荷云层分布在大约  $1.5\sim 5\text{km}$  的高度。直接击向地面的放电通常从负电荷中心的边缘开始。

大多数雷电放电发生在雷云之间,对地面没有直接影响。雷云对大地的放电虽然只占少数,但它是造成雷害事故的主要因素。这里主要介绍雷云对地放电的发展过程。

雷电放电过程可分为先导放电、主放电和余辉放电三个主要阶段。

#### 一、先导放电

雷云下部大部分带负电荷,故绝大多数的雷击是负极性的。雷云中的负电荷会在附近地面感应出大量正电荷,当云中某一电荷中心的电荷较多,雷云与大地之间局部的电场强度达到大气游离所需的电场强度(约  $25\sim 30\text{kV/cm}$ )时,就会使空气游离。当某一段空气游离后,这段空气就由原来的绝缘状态变为导电性的通道,称为先导放电通道。若最大场强方向是对地的,放电就从云中带电中心向地面发展,形成下行雷。先导通道是分级向下发展的,每级先导发展的速度相当快,但每发展到一定的长度(约  $25\sim 50\text{m}$ )就有一个  $30\sim 90\mu\text{s}$  间歇。所以它的平均发展速度较慢(相对于主放电而言),约为  $(1\sim 8)\times 10^5\text{m/s}$ ,出现的电流不大。先导放电的不连续性,称为分级先导,历时约  $0.005\sim 0.01\text{s}$ 。分级先导的原因通常可解释为:由于先导通道内的游离还不是很强烈,通道的导电性就不是很好,雷云中的电荷下移需要一定的时间,待通道头部的电荷增多,电场强度又超过空气的游离场强时,先导放电将又继续发展。

在先导通道发展的初始阶段,其发展方向受到一些偶然因素的影响并不固定。但当它发

展到距地面一定高度时 (这个高度称为定向高度), 先导通道会向地面上某个电场强度较强的方向发展, 这说明先导通道的发展具有“定向性”, 或者说雷击有“选择性”。

当先导接近地面时, 地面上一些高耸的突出物体周围电场强度达到空气游离所需的场强时, 会出现向上的迎面先导。迎面先导在很大程度上影响下行先导的发展方向。

## 二、主放电阶段

当先导通道的头部与迎面先导上的异号感应电荷或与地面之间的距离很小时, 剩余空气间隙中的电场强度达到极高的数值, 造成空气间隙强烈地游离, 最后形成高导电通道, 将先导头部与大地短接, 这就是主放电阶段的开始。游离出来的电子迅速通过被击物流入地中, 形成很大的冲击电流。留下的正离子则向上运动去中和先导通道中的负电荷。剩余间隙中形成新的放电通道, 由于其电离程度比先导通道强烈的多, 电荷密度很大, 故通道具有很高的导电性。主放电的发展速度很高, 约为  $2 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 所以出现极大的脉冲电流, 并产生强烈的光和热, 使空气急剧膨胀震动, 出现闪电和雷鸣。主放电过程是由下向上发展的, 当主放电到达云端时, 放电过程就结束了。

主放电发展的速度极快, 离地越高, 速度就越慢。主放电的持续时间极短, 一般不超过  $100 \mu\text{s}$ 。所产生的电流峰值高达数十甚至数百千安, 电流瞬时值则随着主放电向高空发展而逐渐减小, 形成雷电流冲击波形。

## 三、余辉放电阶段

主放电完成后, 云中的剩余电荷沿着主放电通道继续流向大地, 形成余辉放电。余辉放电电流不大, 约为  $10^3 \sim 10 \text{ A}$ , 持续时间较长 ( $0.03 \sim 0.05 \text{ s}$ )。由于云中同时可能存在几个带电中心, 所以雷电放电往往是重复的, 一般约重复  $2 \sim 3$  次。根据高速摄影照片绘制的多重雷电放电过程示意图如图 6-1 (a) 所示, 图 6-1 (b) 为相应的放电电流波形图。

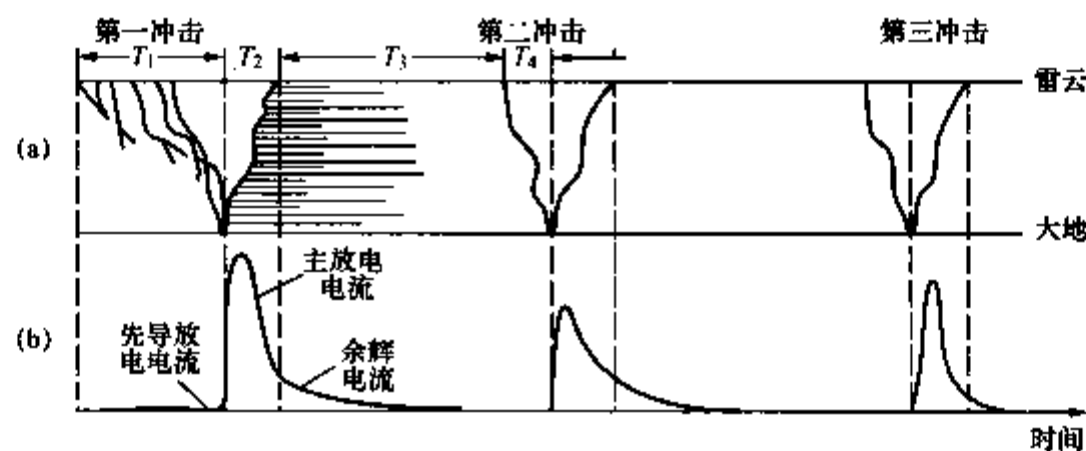


图 6-1 雷电放电的发展过程  
(a) 放电过程示意图; (b) 放电电流波形

# 第二节 雷 电 参 数

## 一、雷电放电的计算模型

对地放电的雷云绝大多数是负极性, 随着先导通道向地面发展, 在附近地面上产生的正电荷也在增加。当先导通道距地面的间隙足够小时, 剩余间隙被击穿, 开始主放电过程。主放电产生的正电荷沿先导通道向上运动去中和通道中的负电荷, 而产生的负电荷则沿雷击点流入大地, 形成极大的主放电电流。

研究表明,先导通道具有分布参数的特征,其波阻抗用  $Z_0$  表示,  $Z_0$  是沿雷击通道运动的电压波与电流波的比值,有关规程建议取  $300 \sim 400 \Omega$ 。则雷击大地时的过程可用图 6-2 来描述,即将先导放电的发展看作是一根均匀分布电荷的长导线自雷云向大地延伸,而将先导头部临近地面时气隙被击穿看作是开关突然闭合。设先导通道中电荷的线密度为  $\sigma$ ,主放电速度为  $v_L$ ,若大地为理想导体(土壤电阻率为 0),则流经主放电通道的电流(即流入大地的电流)为  $\sigma v_L$ 。其极性与雷云的极性相同。雷击地面时的等值电路如图 6-2 (c) 所示。

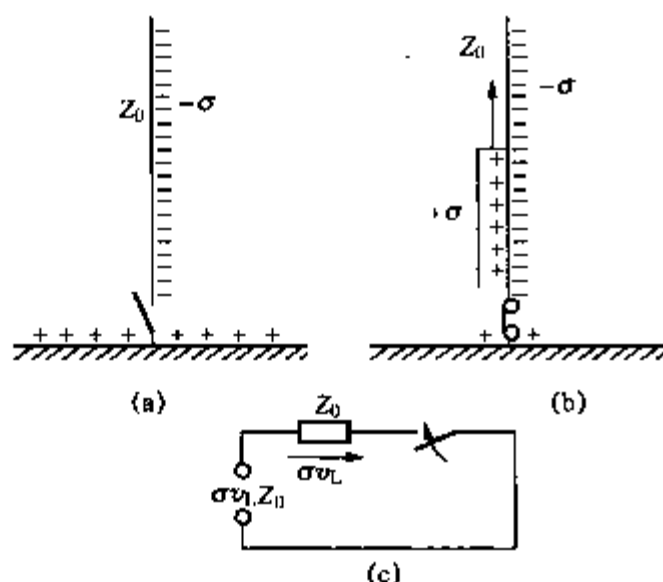


图 6-2 雷击大地时的放电过程

(a) 先导放电; (b) 主放电;  
(c) 计算电流的等值电路

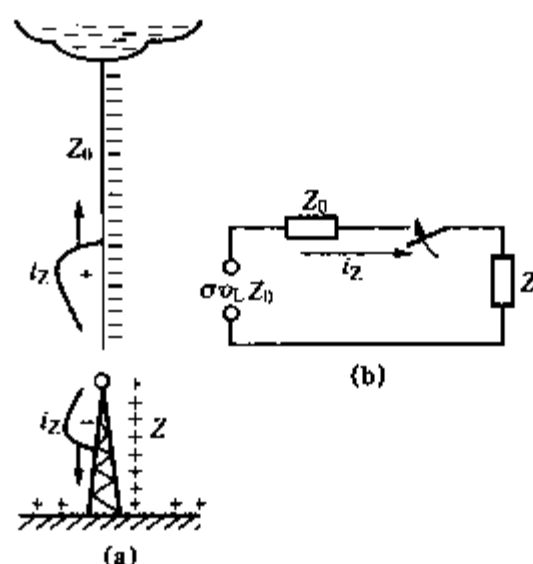


图 6-3 雷击物体时雷电波的运动

(a) 雷电波的运动;  
(b) 计算  $i_Z$  的等值电路

当雷击于避雷针、线路杆塔、架空地线或导线等具有一定阻抗参数的物体时,雷击放电过程可用图 6-3 表示。设被击物的波阻抗为  $Z$ ,则流经被击物体的电流  $i_Z$  为

$$i_Z = \sigma v_L \frac{Z_0}{Z_0 + Z} \quad (6-1)$$

即流经被击物的电流  $i_Z$  与被击物体的波阻抗  $Z$  有关,  $Z$  愈大,  $i_Z$  愈小,反之  $Z$  愈小则  $i_Z$  愈大。当  $Z=0$  时,流经被击物的电流被定义为“雷电流”,用  $i$  表示。由前述可知  $i = \sigma v_L$ ,则上式可改写为

$$i_Z = i \frac{Z_0}{Z_0 + Z} \quad (6-2)$$

式 (6-2) 的等值电路如图 6-4 所示。但实际上被击物的波阻抗不可能为零,当其值小于  $30 \Omega$  时,通过被击物的电流与其为零时相差不多 ( $Z \ll Z_0$ ),故雷电流一般指被击物波阻抗或接地电阻小于  $30 \Omega$  时流过被击物的电流。

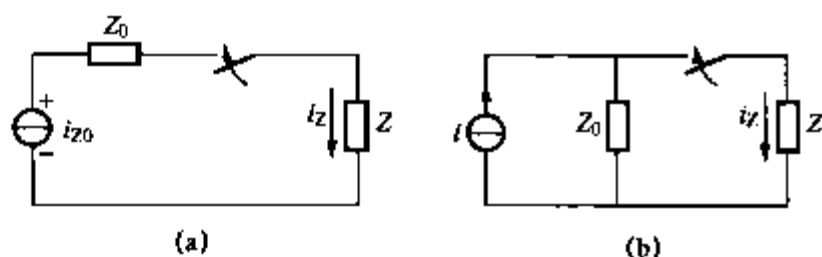


图 6-4 计算流经被击物体电流的等值电路

(a) 电压源等值电路; (b) 电流源等值电路

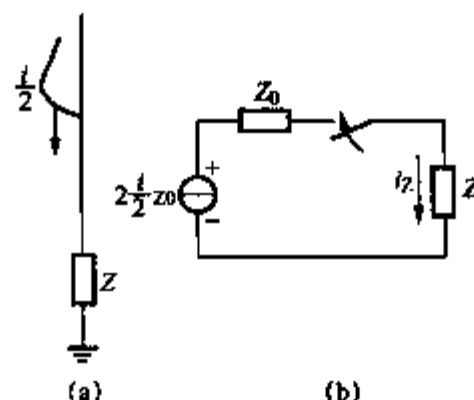


图 6-5 工程实用计算模型及等值电路

从实际效果来看, 可以将雷击物体看作是一个数值为  $i/2$  的雷电流波沿波阻抗为  $Z_0$  的通道向被击物传播的过程, 其计算模型及等值电路如图 6-5 所示。

## 二、雷电参数

雷电放电与气象、地形、地质等许多自然因素有关, 具有很大的随机性, 所以用来表征雷电特性的参数就带有统计的性质。人们通过对雷电进行长期的观察与测量, 积累了不少有关雷电参数的资料, 将获得的数据进行统计分析, 供防雷工程应用。随着对雷电研究的深入, 雷电参数将不断得到修正, 使之更加接近客观实际。下面将雷电特性参数分述如下。

### 1. 雷电活动频度——雷暴日 ( $T_d$ ) 及雷暴小时 ( $T_h$ )

一个地区雷电活动的频繁程度, 通常以该地区多年统计所得到的平均出现的雷暴天数或雷暴小时数来表示。

雷暴日是一年中雷电的天数, 在一天内只要听到雷声就算作一个雷暴日。雷暴小时是一年中雷电的小时数, 在一个小时内只要听到雷声就算作一个雷暴小时。通常三个雷暴小时可折合为一个雷暴日。

雷电活动的频繁程度与地球的纬度及气象条件有关。我国广东的雷州半岛和海南岛的雷电活动频繁而强烈, 雷暴日高达 100~133; 长江以南至北回归线的大部分地区, 雷暴日为 40~80; 长江流域与华北部分地区, 雷暴日数为 40 左右, 长江以北大部分地区为 40~20; 西北地区多在 20 以下。根据雷电活动的频繁程度和雷害的严重程度, 我国把平均年雷暴日数超过 90 的地区称为强雷区, 超过 40 但不超过 90 的地区称为多雷区, 超过 15 但不超过 40 的地区称为中雷区, 不超过 15 的地区称为少雷区。在防雷设计中, 应根据当地的具体情况采用合理的防雷保护措施。

### 2. 地面落雷密度

雷暴日或雷暴小时仅表示某一地区雷电活动的强弱, 它没有区分是雷云之间的放电还是雷云对地面的放电。因为造成雷害事故的是雷云对地面的放电, 所以引入了地面落雷密度 ( $\gamma$ ) 这个参数。它表示在一个雷暴日中, 每平方公里地面上的平均落雷次数。一般  $T_d$  较大的地区, 其  $\gamma$  值也较大。对雷暴日为 40 的地区, 我国《标准》取  $\gamma=0.07$  [次/(雷暴日·km<sup>2</sup>)]。

### 3. 雷电流的极性

雷电的极性是按照从雷云流入大地的电荷极性决定的。据国内外实测结果表明, 负极性雷约占 75~90%。加之负极性的冲击过电压波沿线路传播时衰减减小, 对设备危害大, 故在防雷计算中一般均按负极性考虑。

### 4. 雷电流幅值

雷电流幅值是表示雷电强度的指标。雷电流为一非周期冲击波, 主放电时的电流很大, 但持续时间很短 (约为 40~50 $\mu$ s), 其幅值与云层中电荷的多少、气象及自然条件有关, 是一个随机变量, 只有通过大量实测才能正确估计其概率分布规律。据我国长期进行的大量实测结果, 在一般地区, 雷电流幅值超过  $I$  的概率可用下式计算,

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (6-3)$$

式中  $I$ ——雷电流幅值, kA;

$P$ ——幅值大于  $I$  的雷电流出现的概率。

例如，当雷击时，出现大于 88kA 的雷电流幅值的概率  $P$  约为 10%。

我国除陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区雷电活动较弱，测得的雷电流幅值较小，可改用下式计算其出现的概率，

$$\lg P = -\frac{I}{44} \tag{6-4}$$

5. 雷电流的波头 ( $T_1$ )、陡度  $\alpha$  及波长 ( $T_2$ )

据实测结果，雷电冲击波的波头长度大多在  $1\sim5\mu\text{s}$  的范围内，平均为  $2.6\mu\text{s}$  左右。雷电流的波长（半峰值时间）在  $20\sim100\mu\text{s}$  范围内，多为  $50\mu\text{s}$  左右。在防雷计算中，雷电流的波形可采用  $2.6/50\mu\text{s}$ 。

雷电流的幅值和波头时间决定了雷电流的上升陡度。雷电流的陡度对雷击过电压的影响很大，我国采用  $2.6\mu\text{s}$  的固定波头长度，所以雷电流波头的平均陡度为

$$\alpha = \frac{I}{2.6} (\text{kA}/\mu\text{s}) \tag{6-5}$$

即幅值较大的雷电流其陡度也较大。

6. 雷电流的计算波形

实测结果表明，雷电流的幅值、波头、波长、陡度等参数都在很大的范围内变化，但其波形都是非周期性的冲击波。在防雷计算中，要求将雷电流波形等值为典型化、可用公式表达、便于计算的波形。常用的等值波形有三种，如图 6-6 所示。

图 6-6 (a) 为标准冲击波。是一双指数函数的波形，可表示为  $i = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ 。式中  $I_0$  为某一固定电流值， $\alpha$ 、 $\beta$  是两个常数， $t$  为作用时间。

图 6-6 (b) 为斜角平顶波，其波前陡度  $\alpha$  可由给定的雷电流幅值  $I$  和波头时间决定。

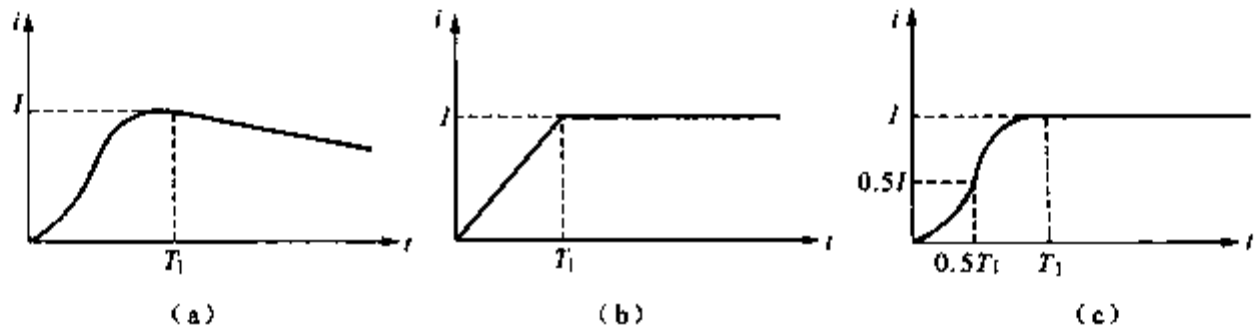


图 6-6 雷电流的等值计算波形  
(a) 双指数波；(b) 斜角平顶波；(c) 半余弦波

图 6-6 (c) 为半余弦波，其波头可表示为  $i = \frac{I}{2}(1 - \cos \omega t)$ ，仅在设计特殊大跨越、高杆塔时使用。

第三节 避雷针和避雷线的保护范围

为了防止雷直击设备，通常采用避雷针或避雷线进行保护。从前面叙述可知，当雷云先导通道接近地面时，雷电朝地面电场强度最大的方向发展，避雷针（线）正是利用这种特性制成的。

避雷针由接闪器、引下线和接地体三部分构成。

接闪器。是避雷针的最高部分，用来接受雷电放电，可用直径  $10\sim12\text{mm}$ 、长  $1\sim2\text{m}$  的

圆钢制成。

引下线。它的主要任务是将接闪器上的雷电流安全导入接地体,使之顺利入地。引下线可用镀锌钢绞线、圆钢、扁钢制成。因雷电流很大,所以引下线须有足够的截面。

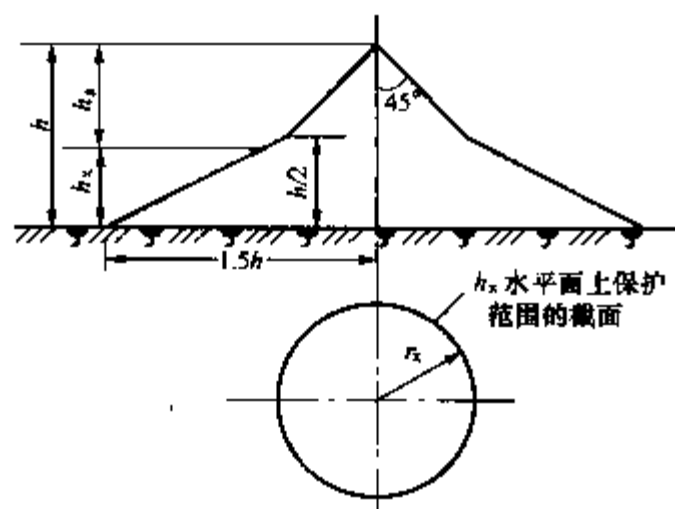


图 6-7 单支避雷针的保护范围

接地体。它的作用是使雷电流顺利入地,并且减小雷电流通过时产生的压降。一般由几根 2.5m 长的  $40 \times 40 \times 4\text{mm}$  的角钢打入地下,再并联后与引下线可靠连接。

在一定高度的避雷针下面,有一个安全区域,在这个区域中物体遭受雷击的概率很小(约 0.1% 左右),这个安全区域称为避雷针的保护范围。可由模拟试验和运行经验确定。避雷针一般用于保护发电厂和变电站。

## 一、避雷针的保护范围

### 1. 单支避雷针

单支避雷针的保护范围如图 6-7 所示。设避雷针的高度为  $h$  (m), 被保护物体的高度为  $h_x$  (m), 则避雷针的有效高度  $h_s = h - h_x$ 。在  $h_x$  高度上避雷针保护范围的半径  $r_x$  (m) 可按下式计算

$$\text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时,} \quad r_x = (h - h_x)p \text{ (m)} \quad (6-6)$$

$$\text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时,} \quad r_x = (1.5h - 2h_x)p \text{ (m)} \quad (6-7)$$

式中  $p$ ——高度影响系数。当  $h \leq 30\text{m}$  时,  $p=1$ ; 当  $30\text{m} < h \leq 120\text{m}$  时,  $p = \frac{5.5}{\sqrt{h}}$ ; 当  $h > 120\text{m}$  时, 取其等于 120m。

### 2. 两支等高避雷针

工程上多采用两支或多支避雷针以扩大保护范围, 两支等高避雷针的联合保护范围如图 6-8 所示, 比两支避雷针各自的保护范围的叠加要大一些。两支避雷针外侧的保护范围可

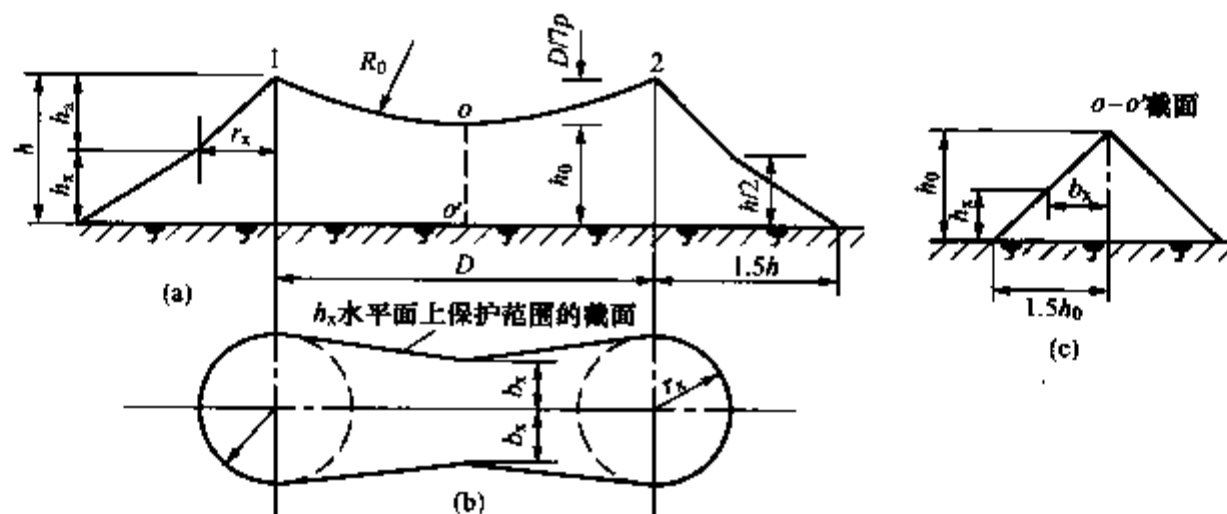


图 6-8 两支等高避雷针的联合保护范围

(a) 两支等高避雷针参数; (b)  $h_x$  水平面上的保护范围; (c)  $o-o'$  截面的保护范围

按单支避雷针的计算方法确定, 两支避雷针之间的保护范围可由下式求得

$$h_0 = h - \frac{D}{7p} \quad (6-8)$$

$$b_x = 1.5(h_0 - h_x) \quad (6-9)$$

式中  $h_0$  ——两针保护范围上部边缘最低点的高度, m;

$D$  ——两避雷针间的距离, m;

$2b_x$  ——在高度  $h_x$  的水平面上, 保护范围的最小宽度, m。

两针间高度为  $h_x$  的水平面上的保护范围截面见图 6-8 (b)。o—o' 截面图中, 两针中间地面上的保护宽度为  $1.5h_0$ 。

为了使两针能构成联合保护, 两针间距离与针高之比  $D/h$  不宜大于 5。

### 3. 两支不等高避雷针

两避雷针外侧的保护范围按单针的方法确定, 两针间的保护范围, 先按单支避雷针的方法作出较高针 1 的保护范围, 然后经较低针 2 的顶部作水平线与之相交于 3 点, 由 3 点对地面做垂线, 将此垂线看作一假想避雷针, 再按两支等高避雷针求出 2 针与 3 针的保护范围, 即可得到总的保护范围, 如图 6-9 所示。

$$f = D'/(7p) \quad (6-10)$$

式中  $D'$  ——较低避雷针与假想避雷针间的距离, m;

$f$  ——圆弧的弓高, m。

### 4. 多支等高避雷针的保护范围

三支等高避雷针所形成的三角形的外侧保护范围, 应分别按两支等高避雷针的计算方法确定。只要在三角形内被保护物最大高度  $h_x$  水平面上, 各相邻避雷针间保护范围的一侧最小宽度  $b_x \geq 0$  时, 则三针组成的三角形内部就可受到保护。

四支及以上等高避雷针所形成的四角形或多角形, 可以先将其分成两个或几个三角形, 然后分别按三支等高避雷针的方法计算。如图 6-10 (b) 所示。

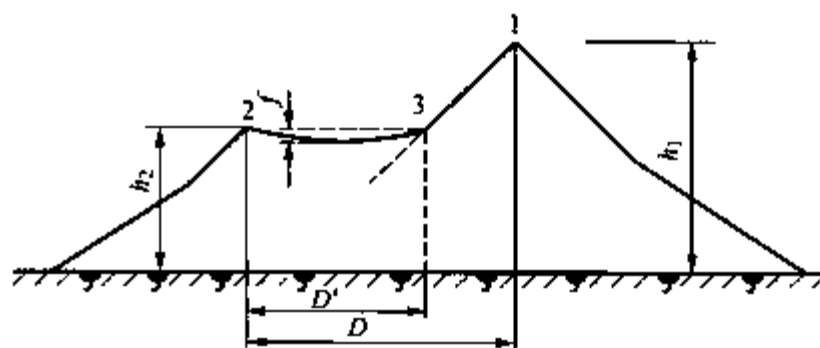


图 6-9 两支不等高避雷针的保护范围

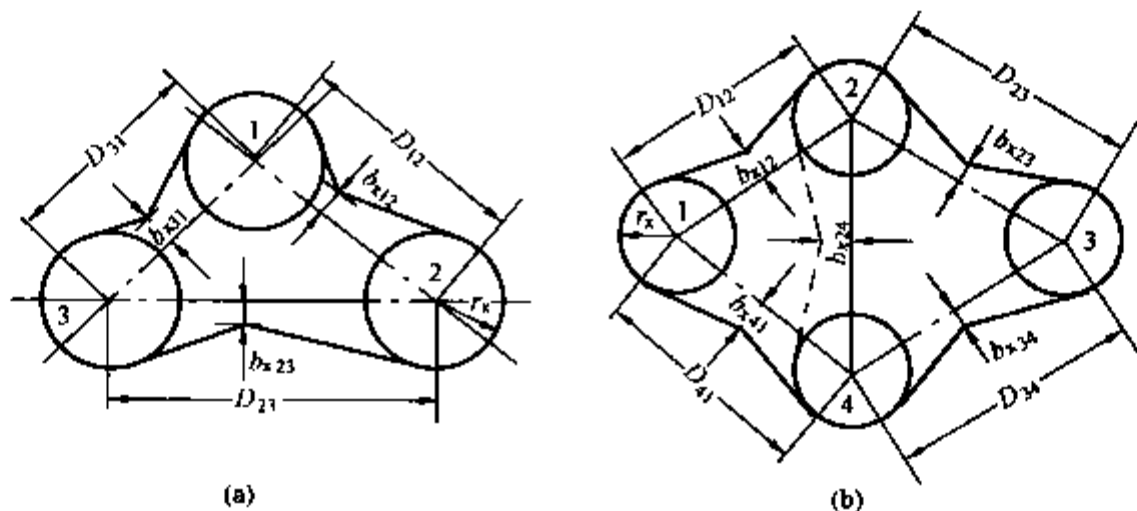


图 6-10 三支和四支等高避雷针的保护范围

(a) 三支等高避雷针; (b) 四支等高避雷针

## 二、避雷线的保护范围

避雷线也叫架空地线,它是悬挂在高空的接地导线,其作用和避雷针一样,起引雷作用。避雷线是输电线路防雷保护最基本的措施之一。

单根避雷线的保护范围见图 6-11 所示。单根避雷线在  $h_x$  水平面上每侧保护范围的宽度按下式确定

$$\text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时,} \quad r_x = 0.47(h - h_x)p \quad (6-11)$$

$$\text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时,} \quad r_x = (h - 1.53h_x)p \quad (6-12)$$

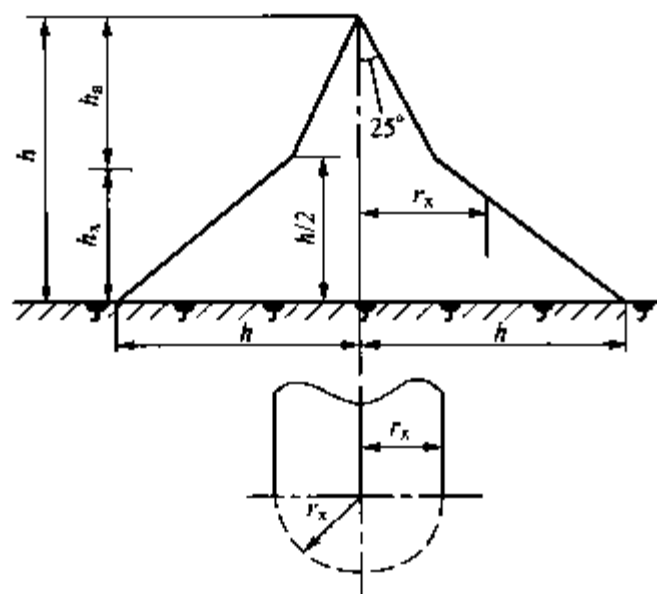


图 6-11 单根避雷线的保护范围

两根平行等高避雷线的保护范围见图 6-12 所示。两根避雷线外侧的保护范围同于单根,两线之间横截面的保护范围由通过两避雷线 1、2 点及保护上部边缘最低点 O 的圆弧确定。O 点的高度按下式计算

$$h_0 = h - \frac{D}{4p} \quad (6-13)$$

式中  $h_0$ ——两避雷线间保护范围上部边缘最低点高度, m;

$D$ ——两避雷线间距离, m;

$h$ ——避雷线的高度, m。

避雷线的保护范围是一个狭长的带状区域,所

以适合用来保护输电线路,也可用来作为变电站的直击雷保护措施。用避雷线保护线路时,避雷线对外侧导线的屏蔽作用以保护角  $\alpha$  表示。保护角是指避雷线和外侧导线的连线与避雷线的铅垂线之间的夹角,如图 6-13 所示。保护角越小,保护性能越好。当保护角过大时,雷可能绕过避雷线击在导线上(称为绕击)。要使保护角减小,就要增加杆塔的高度,会使线路造价增加,所以应根据线路的具体情况采用合适的保护角,一般取  $10^\circ \sim 25^\circ$ 。

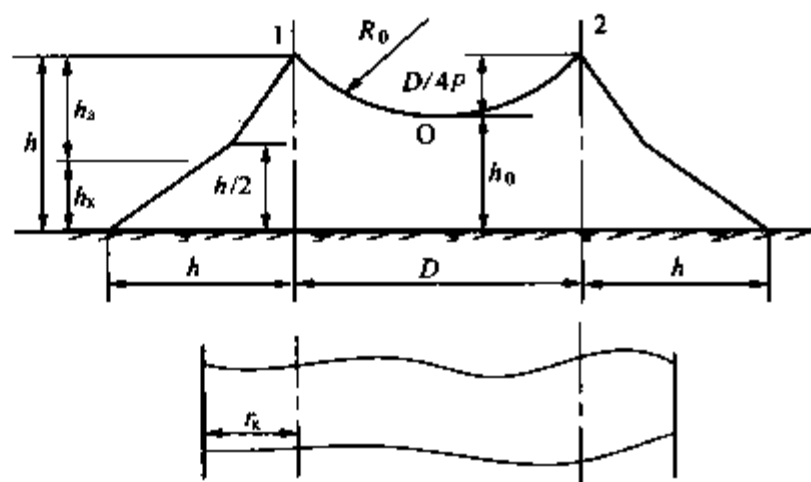


图 6-12 两平行避雷线的保护范围

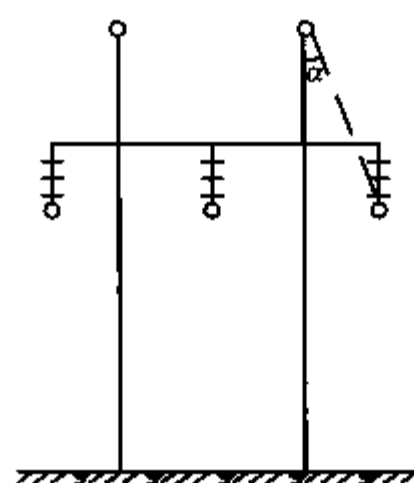


图 6-13 避雷线的保护角

## 第四节 避雷器

避雷器是用以限制沿线路侵入的雷电过电压或操作过电压的一种过电压保护装置。它实

质上是一个放电器，与被保护的电气设备并联连接，当作用在避雷器上的电压超过避雷器的放电电压时，避雷器先放电，从而限制过电压的幅值，使与之并联的电气设备得到保护。

当避雷器动作（放电）将强大的雷电流引入大地之后，由于系统还有工频电压的作用，避雷器中将流过工频短路电流，此电流称为工频续流，通常以电弧放电的形式存在。若工频电弧不能很快熄灭，继电保护装置就会动作，使供电中断。所以，避雷器应在过电压作用过后，能迅速切断工频续流，使电力系统恢复正常运行，避免供电中断。

目前使用的避雷器主要有四种类型：保护间隙、排气式避雷器、阀型避雷器和氧化锌避雷器。保护间隙和排气式避雷器主要用于发电厂、变电站的进线保护段、线路的绝缘弱点、交叉档或大跨越档杆塔的保护。阀型避雷器和氧化锌避雷器用于配电系统、发电厂、变电站的防雷保护。

### 一、保护间隙和排气式避雷器

#### 1. 保护间隙

保护间隙是最简单最原始的避雷器。常用的角形保护间隙如图 6-14 所示，由主间隙 1 和辅助间隙 2 串联而成。主间隙的两个电极做成角形，这样可以使工频续流电弧在电动力和热气流作用下上升被拉长而自行熄弧，但熄弧能力很小。辅助间隙是为防止主间隙被外物短路而装设的。

保护间隙的优点是结构简单、价廉；缺点是保护效果差，与被保护设备的伏秒特性不易配合，动作后产生截波，电弧不易熄灭。常用于 3~10kV 电网中，应与自动重合闸配合使用。

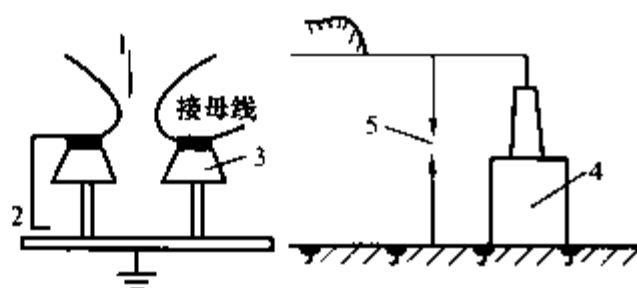


图 6-14 角型保护间隙接线及结构

1—主间隙；2—辅助间隙；3—瓷瓶；  
4—被保护设备；5—保护间隙

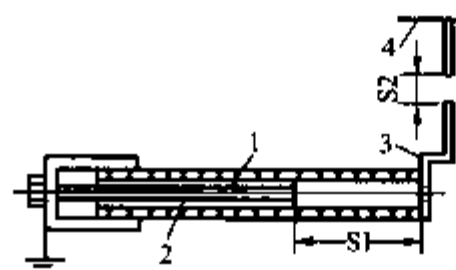


图 6-15 排气式避雷器原理结构

1—产气管；2—棒型电极；3—环形电极；  
4—工作线；S1—内间隙；S2—外间隙

#### 2. 排气式避雷器

排气式避雷器实质上是一只具有较强灭弧能力的保护间隙，其结构如图 6-15 所示。它由装在产气管 1 中的内部间隙 S1（由棒电极 2、环形电极 3 构成）和外部间隙 S2 构成。S2 的作用是使产气管在正常情况下不承受电压，以防止管子表面长时间流过泄漏电流使其损坏。产气管由纤维、塑料或橡胶等产气材料制成。

排气式避雷器的工作原理如下：在雷电过电压的作用下，避雷器的内外间隙均被击穿，雷电流通过接地装置流入地中。之后，在系统工频电压的作用下，间隙中流过工频短路电流。工频续流电弧的高温使产气管分解出大量气体，由于管内容积很小，管内压力升高，高压气体急速地从环形电极的开口孔猛烈喷出，对电弧产生纵吹作用，使工频续流在第一次过零时被切断，系统恢复正常工作。

为使工频续流电弧熄灭，排气式避雷器必须能产生足够的气体，而产生气体的多少与工频续流的大小以及电弧与产气管的接触面积有关。续流过小，产气不足，不能切断电弧；但

若续流过大,产气过多,压力太大会使避雷器爆炸。因此,排气式避雷器有切断电流的上下限。避雷器安装地点系统最大短路电流应小于排气式避雷器灭弧电流的上限,最小短路电流应大于排气式避雷器灭弧电流的下限。

排气式避雷器的主要缺点是伏秒特性陡,放电分散性大,与被保护设备的伏秒特性不易配合。避雷器动作后母线直接接地形成截波,对变压器的纵绝缘不利。此外放电特性受大气条件影响较大,故主要用于线路交叉档和大跨越档处,以及变电站的进线段保护。

## 二、阀型避雷器

阀型避雷器由多个火花间隙和非线性电阻盘(阀片)串联构成,装在瓷套里密封起来。由于采用电场较均匀的火花间隙,其伏秒特性较平坦,放电的分散性较小,能与伏秒特性较平的变压器的绝缘较好配合。

它的工作原理是:当系统正常工作时,间隙将阀片电阻与工作母线隔离,以免由于工作电压在阀片电阻中产生的电流使阀片烧坏。当系统中出现雷电过电压且其峰值超过间隙的放电电压时,火花间隙迅速击穿,雷电流通过阀片流入大地,从而使作用于设备上的电压幅值受到限制。当过电压消失后,间隙中将流过工频续流,由于受到阀片电阻的非线性特性的限制,工频续流远较冲击电流为小,使间隙能在工频续流第一次经过零值时将电流切断,使系统恢复正常工作。

雷电流流过阀片电阻时,在其上会产生一压降,此压降的最大值称为“残压”,残压会作用在与避雷器并联的被保护设备的绝缘上,所以应尽量限制“残压”。被保护设备的冲击耐压值必须高于避雷器的冲击放电电压和残压,其绝缘才不会被损坏。若能降低避雷器的这两项参数,则设备的冲击耐压值也可相应下降。

阀型避雷器分为普通型和磁吹型两类。

### (一) 普通阀型避雷器

普通阀型避雷器有配电型(FS)和电站型(FZ)两类。

#### 1. 火花间隙

普通阀型避雷器的火花间隙由很多个短间隙串联而成,单个火花间隙的结构如图 6-16

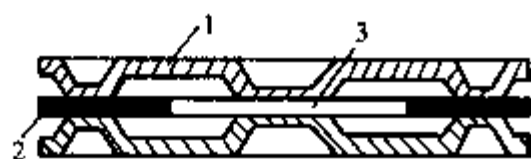


图 6-16 普通阀型避雷器单个火花间隙

1—黄铜电极; 2—云母垫圈; 3—工作间隙

所示。间隙的电极用黄铜材料做成,中间用厚约 0.5mm 的云母垫圈隔开。因间隙工作面处距离很小,间隙电场近似均匀。此外,过电压作用时,云母垫圈与电极之间的空气隙中先发生电晕,对间隙产生照射作用,从而缩短了间隙的放电时间,所以间隙具有比较平坦的伏秒特性,放电的分散性也很小,其冲击系

数近似等于 1。单个间隙的工频放电电压约为 2.7~3.0kV (有效值),在没有热电子发射的情况下,单个间隙的初始恢复强度可达 250V 左右。250V 是续流为正弦波时的耐压值,由于阀型避雷器的电阻阀片是非线性的,其续流的波形为尖顶波,因此电流过零前的一段时间内电流值很小,电流过零时弧隙中的游离状态已大为减弱,所以单个间隙的初始恢复强度可达 700V 左右。串联的间隙越多,总的恢复强度越大。所以根据需要,可将多个单个间隙串联起来,以得到很高的初始耐压值,防止续流过零后电弧重燃,达到切断续流的目的。

一般由几个单个火花间隙组成标准火花间隙组,如图 6-17 所示。根据需把若干个标准火花间隙组串联在一起,就构成全部火花间隙。避雷器动作后,工频续流电弧被间隙的电

极分割成许多个短弧,靠极板上复合与散热作用,去游离程度较高,更易于切断工频续流。

当多个间隙串联使用时,存在一个问题,就是电压分布不均匀和不稳定,即一些间隙上承受的电压高,而另一些间隙上的电压较低。这样,将使避雷器的灭弧能力降低,工频放电电压也下降和不稳定。引起电压分布不均匀的原因是多个短间隙串联后将形成一等值电容链,各个间隙的电极对地及对高压端有寄生电容存在,使得沿串联间隙上通过的电流不相等,因而沿串联间隙上的电压分布也不相等。为了解决这个问题,

对 FZ 系列避雷器可采用分路电阻使电压分布均匀,其原理接线如图 6-18 所示。

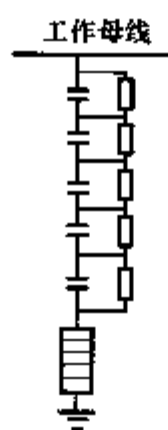


图 6-18 带分路电阻的阀型避雷器示意图

在工频电压作用下,由于间隙的等值容抗大于分路电阻,所以流过分路电阻中的电流比流过间隙中的电容电流大,电压分布主要取决于并联电阻值,只要电阻选取合适,可使电压分布得以改善。在冲击电压作用下,由于其等值频率很高,间隙上的电压分布主要由电容决定,仍不均匀。因此,对多间隙的高压避雷器,其冲击放电电压反而会小于工频放电电压,其冲击系数  $\beta$  常小于 1。串联的间隙愈多,冲击放电电压与工频放电电压之差愈大。

采用分路电阻均压后,在系统工作电压作用下,分路电阻中将长期有电流流过。因此分路电阻应有足够大的电阻值和热容量,通常采用以 SiC 为主要材料的非线性电阻。

## 2. 阀片电阻

为了有较好的保护效果,希望在一定幅值(普通阀型避雷器为 5kA)、一定波形(10/20 $\mu$ s)的雷电流流过阀片电阻时,产生的最大压降(残压)愈小愈好,即电阻的阻值愈小愈好。另一方面,为可靠地熄弧,必须限制续流的大小,希望在工频电压作用下流过间隙及阀片的续流不超过规定值(FS 系列为 50A, FZ 系列为 80A)。即此时电阻要有足够的数值。由此可见,只有电阻值随电流大小而变化的非线性电阻才能同时满足上述两个要求。

避雷器中所用的非线性电阻通常称为阀片电阻,是由碳化硅(SiC)加粘合剂在 300~350 $^{\circ}$ C 的温度下烧制而成的圆饼形电阻片,将若干个阀片叠加起来就组成工作电阻。阀片的电阻值与流过电流的大小有关,呈非线性变化。电流越大时电阻越小;电流越小时电阻越大。阀片电阻的伏安特性如图 6-19 所示,其表达式为

$$u = Ci^{\alpha} \quad (6-14)$$

式中  $C$ ——常数,等于阀片上流过 1A 电流时的压降,与阀片的材料和尺寸有关;

$\alpha$ ——阀片的非线性系数,  $0 < \alpha < 1$ , 其值与阀片材料有关,  $\alpha$  愈小非线性愈好。

由于阀片电阻的非线性,使间隙在冲击放电瞬间因通过的冲击电流值较小而呈现较高的

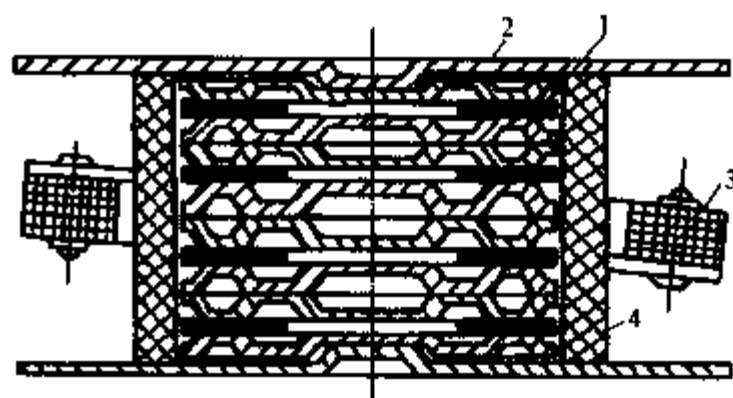


图 6-17 标准火花间隙组

1—单个间隙; 2—黄铜盖板;  
3—分路电阻; 4—瓷套筒

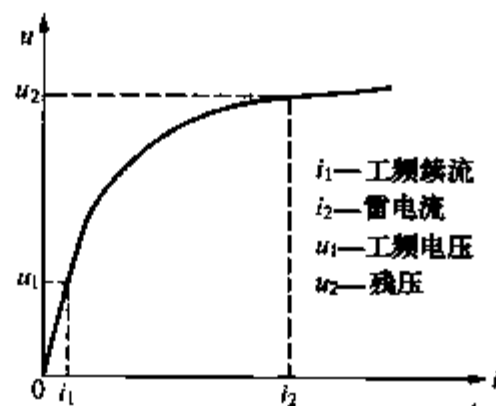


图 6-19 阀片的静态伏安特性

阻值, 放电瞬间的压降较大, 故减小了截断波电压值。当电流增大时, 阀片呈现较低的阻值, 使避雷器上电压降低, 增加了避雷器的保护效果。在工频电压作用下, 阀片呈现极高的阻值将续流限制的较小, 从而使间隙能够在工频续流第一次过零时将电弧切断。

## (二) 磁吹避雷器

为进一步提高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一种新的带磁吹间隙的阀型避雷器, 简称磁吹避雷器。其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阀片电阻。

磁吹避雷器的火花间隙是利用磁场对电弧的电动力作用, 使电弧拉长或旋转, 以增强弧柱中的去游离作用, 从而大大提高间隙的灭弧能力。

目前采用的将电弧拉长的磁吹间隙结构如图 6-20 所示。这种磁吹间隙能切断 450A 左右的工频续流。由于电弧被拉得很长, 且处于去游离很强的灭弧栅中, 故电弧电阻很大, 可起到限制续流的作用, 因而这种间隙又称为限流间隙。当采用这种限流间隙后, 可减少阀片数目, 使避雷器的残压降低。

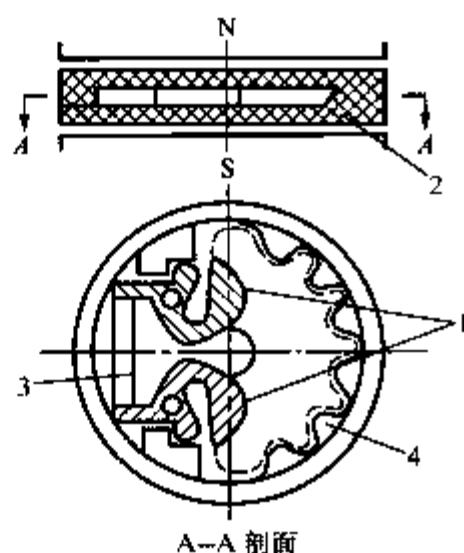


图 6-20 限流式磁吹间隙

1—角状电极；2—灭弧盒；  
3—并联电阻；4—灭弧栅

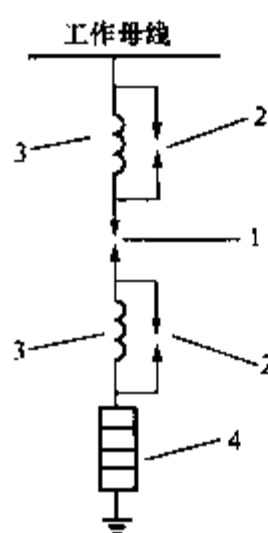


图 6-21 磁吹避雷器的结构原理图

1—主间隙；2—辅助间隙；  
3—磁吹线圈；4—阀片电阻

其原理接线如图 6-21 所示。磁场由与主间隙串联的磁吹线圈 3 产生, 当雷电流通过磁吹线圈时, 在线圈感抗上出现较大的压降, 这样会增大避雷器的残压, 使避雷器的保护性能变坏。为此, 在磁吹线圈 3 两端并联以辅助间隙 2, 在冲击过电压作用下, 线圈两端的压降会使辅助间隙击穿, 则放电电流经过辅助间隙 2、主间隙 1 和阀片电阻 4 流入大地, 这样不致使避雷器的残压增大。而当工频续流流过时, 磁吹线圈的压降较低, 不足以维持辅助间隙放电, 电流很快转入线圈中, 并发挥磁吹作用。

磁吹避雷器所采用的阀片电阻也是以 SiC 为主要原料加粘合剂在  $1350^{\circ}\text{C} \sim 1390^{\circ}\text{C}$  的高温下焙烧制成的, 所以称高温阀片。其通流容量较大, 能通过  $20/40\mu\text{s}$ 、10kA 的冲击电流和  $2000\mu\text{s}$ 、800~1000A 的方波电流各 20 次。不易受潮, 但非线性系数较高 ( $\alpha \approx 0.24$ )。

磁吹避雷器有保护旋转电机用的 FCD 型及电站用的 FCZ 型两种。

## (三) 阀型避雷器的电气参数

### 1. 额定电压

指正常运行时, 加在避雷器上的工频工作电压, 应与其安装地点的电力系统的电压等级相同。

## 2. 灭弧电压

指保证避雷器能够在工频续流第一次过零值时灭弧的条件下,允许加在避雷器上的最高工频电压。灭弧电压应大于避雷器安装地点可能出现的最大工频电压。

据实际运行经验,系统可能出现已经存在单相接地故障而非故障相的避雷器又发生放电的情况。因此,单相接地故障时非故障相的电压升高,就成为可能出现的最高工频电压,避雷器应保证在这种情况下可靠熄弧。在中性点直接接地系统中,发生单相接地故障时非故障相的电压可达系统最大工作线电压的80%;在中性点不接地系统和经消弧线圈接地的系统分别可达系统最大工作线电压的110%和100%。所以对110kV及以上的中性点直接接地系统的避雷器,其灭弧电压规定为系统最大工作线电压的80%,对35kV及以下的中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统的避雷器,其灭弧电压分别取系统最大工作线电压的110%和100%。

## 3. 工频放电电压

指在工频电压作用下,避雷器将发生放电的电压值。由于间隙的击穿电压具有分散性,工频放电电压都是给出上限和下限值。作用在避雷器上的工频电压超过下限时,避雷器将会击穿放电。由于普通阀型避雷器的灭弧能力和通流容量都是有限的,一般不允许它们在内过电压作用下动作,因此通常规定其工频放电电压的下限应不低于该系统可能出现的内过电压值。

## 4. 冲击放电电压

指在冲击电压作用下避雷器的放电电压(幅值),通常给出的是上限值。对额定电压为220kV及以下的避雷器,指的是在标准雷电冲击波下的放电电压(幅值)的上限。对于330kV及以上的超高压避雷器,除了雷电冲击放电电压外,还包括在标准操作冲击波下的冲击放电电压值。

## 5. 残压(峰值)

指雷电流通过避雷器时,在阀片电阻上产生的电压降(峰值)。由于残压的大小与通过的雷电流的幅值有关,我国标准规定:通过避雷器的额定雷电冲击电流,220kV及以下系统取5kA,330kV及以上系统取10kA,波形为8/20 $\mu$ s。

避雷器的残压和冲击放电电压决定了避雷器的保护水平。为了降低被保护设备的冲击绝缘水平,必须同时降低避雷器的残压和冲击放电电压。

此外,还有如下几个常用来综合评价避雷器整体保护性能的技术指标。

(1) 冲击系数。指避雷器冲击放电电压与工频放电电压幅值之比,与避雷器的结构有关。一般希望冲击系数接近于1,这样避雷器的伏秒特性就比较平坦,有利于绝缘配合。

(2) 切断比。它等于避雷器的工频放电电压(下限)与灭弧电压之比。是表示间隙灭弧能力的一个技术指标。切断比愈小,说明绝缘强度的恢复愈快,灭弧能力愈强。一般普通阀型避雷器的切断比为1.8,磁吹避雷器的切断比为1.4。

(3) 保护比。等于避雷器的残压与灭弧电压之比。保护比愈小,说明残压愈低或灭弧电压愈高,因而保护性能愈好。FS和FZ系列的保护比分别为2.5和2.3左右,FCZ系列为1.7~1.8。

各类阀型避雷器的主要电气特性参数见表6-1、6-2和6-3。

表 6-1 普通阀型避雷器（FS 和 FZ 系列）的电气特性

型 号	额定电压 (有效值) kV	灭弧电压 (有效值) kV	工频放电电压 (干燥及淋雨状态) (有效值) kV		冲击放电电压 (预 放电时间 1.5~2.0μs) kV, 不大于		冲击残压 (波形 8/20μs) kV, 不大于				备 注
							FS 系列		FZ 系列		
			不小于	不大于	FS 系列	FZ 系列	3kA	5kA	3kA	10kA	
FS—0.25	0.22	0.25	0.6	1.0	2.0		1.3				组合元件用 组合元件用 组合元件用
FS—0.50	0.38	0.50	1.1	1.6	2.7		2.6				
FS—3 (FZ—3)	3	3.8	9	11	21	20	(16)	17	14.5	(16)	
FS—6 (FZ—6)	6	7.6	16	19	35	30	(28)	30	27	(30)	
FS—10 (FZ—10)	10	12.7	26	31	50	45	(47)	50	45	(50)	
FZ—15	15	20.5	42	52		78			67	(74)	
FZ—20	20	25	49	60.5		85			80	(88)	
FZ—30J	30	25	56	67		110			83	(91)	
FZ—35	35	41	84	104		134			134	(148)	
FZ—40	40	50	98	121		154			160	(176)	
FZ—60	60	70.5	140	173		220			227	(250)	110kV 变 压 器中性点 保护专用
FZ—110J	110	100	224	268		310			332	(364)	
FZ—154J	154	142	304	368		420			466	(512)	
FZ—220J	220	200	448	536		630			664	(728)	

注 残压栏内加括号者为参考值。

表 6-2 电站用磁吹阀型避雷器（FCZ 系列）电气特性

型 号	额定电压 (有效值) kV	灭弧电压 (有效值) kV	工频放电电压 (干 燥及淋雨状态) (有效值) kV		冲击放电电压 kV, 不大于		冲击电流残压 (波形 8/20μs) kV, 不大于		备注
			不小于	不大于	预放电时间 (1.5~20) μs 及 波形 1.5/40μs	预放电时间 (100~1000) μs	5kA	10kA	
FCZ-35	35	41	70	85	112	—	108	122	110kV 变压器中 性点保护 专用
FCZ-40	—	51	87	98	134	—	①	205	
FCZ-60	60	69	117	133	178	—	178	285	
FCZ-110J	110	100	170	195	260	(285)	260	365	
FCZ-110	110	126	255	290	345	—	332	512	
FCZ-154	154	177	330	377	500	—	466	570	
FCZ-220J	220	200	340	390	520	(570)	520	820	
FCZ-330J	330	290	510	580	780	820	740	1100	
FCZ-500J	500	440	680	790	840	1030	—		

① 1.5kA 冲击残压为 134kV。

表 6-3 保护旋转电机用磁吹阀型避雷器 (FCD 系列) 电气特性

型 号	额定电压 (有效值) kV	灭弧电压 (有效值) kV	工频放电电压 (干燥及淋雨状态) (有效值) kV		冲击放电电压预放 电时间 (1.5~20) $\mu$ s 及波形 1.5/40 $\mu$ s (kV), 不大于	冲击电流残压 (波形 8/20 $\mu$ s) (kV), 不大于		备 注
			不小于	不大于		3kA	5kA	
FCD-2	—	2.3	4.5	5.7	6	6	6.4	电机中性点 保护专用
FCD-3	3.15	3.8	7.5	9.5	9.5	9.5	10	
FCD-4	—	4.6	9	11.4	12	12	12.8	电机中性点 保护专用
FCD-6	6.3	7.6	15	18	19	19	20	
FCD-10	10.5	12.7	25	30	31	31	33	
FCD-13.2	13.8	16.7	33	39	40	40	43	
FCD-15	15.75	19	37	44	45	45	49	

三、氧化锌避雷器

1. 氧化锌阀片和伏安特性

20 世纪 70 年代出现的氧化锌避雷器是一种全新的避雷器，其核心元件是 ZnO 阀片，它是以氧化锌为主要材料，掺以多种微量金属氧化物，如氧化铋 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )、氧化钴 ( $\text{Co}_2\text{O}_3$ )、氧化锰 ( $\text{MnO}_2$ )、氧化锑 ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ )、氧化铬 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 等，经过成型、烧结、表面处理等工艺过程而制成。

氧化锌阀片的伏安特性可分为小电流区、非线性区和饱和区，如图 6-22 所示。电流在 1mA 以下的区域为小电流区 I，非线性系数  $\alpha$  较高，约 0.1~0.2 左右；电流在 1mA 至 3kA 范围内时为非线性区 II，用关系式  $u=Ci^\alpha$  表示，式中  $\alpha=0.015\sim0.05$ ；电流大于 3kA，一般进入饱和区 III，电压增加时，电流增长不快，伏安特性曲线向上翘。

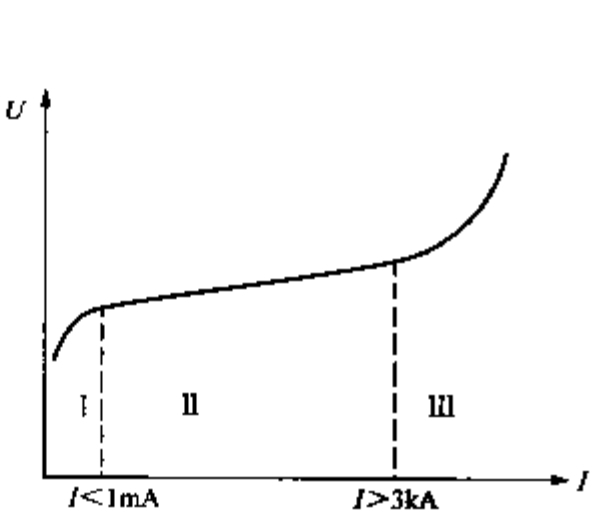


图 6-22 ZnO 避雷器的伏安特性

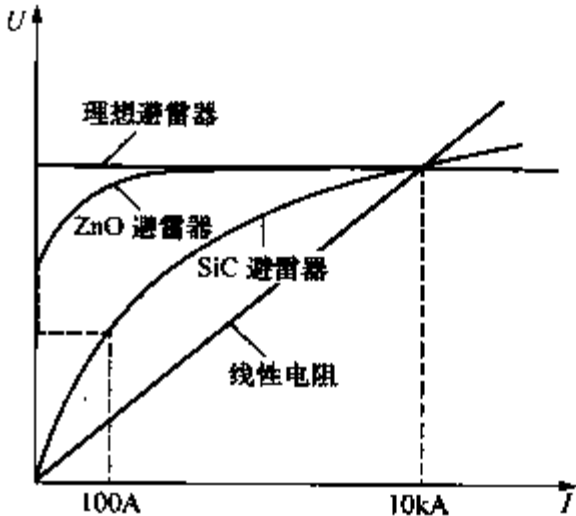


图 6-23 ZnO、SiC 和理想避雷器伏安特性的比较

与 SiC 阀片相比，ZnO 阀片具有很理想的非线性伏安特性，图 6-23 所示是 SiC 避雷器与 ZnO 避雷器及理想避雷器电阻阀片的伏安特性曲线。图中假定 ZnO、SiC 电阻阀片在 10kA 电流下的残压相同，那么在额定电压下，SiC 阀片中将流过 100A 左右的电流，而 ZnO 阀片中流过的电流为  $\mu$ A 级，即在工作电压下，ZnO 阀片实际上相当一绝缘体，所以可不用间隙与系统隔离。

与由 SiC 阀片和串联间隙构成的传统避雷器相比, 氧化锌无间隙避雷器具有下述优点:

(1) 保护性能优越。由于 ZnO 阀片具有优异的伏安特性, 进一步降低其保护水平和被保护设备绝缘水平的潜力很大, 特别是它没有火花间隙, 所以不存在放电时延, 具有很好的陡波响应特性。

(2) 无续流, 动作负载轻, 耐重复动作能力强。在工作电压下流过的电流极小, 为  $\mu\text{A}$  级, 实际上可视为无续流。所以在雷击或操作过电压作用下, 只需吸收过电流能量, 不需吸收续流能量。氧化锌避雷器在大电流长时间重复动作的冲击作用下, 特性稳定, 所以具有耐受多重雷和重复动作的操作冲击过电压的能力。

(3) 通流容量大。氧化锌阀片单位面积的通流能力为碳化硅阀片的 4~5 倍, 而且很容易采用多柱阀片并联的办法进一步增大通流容量。通流容量大的优点使得氧化锌避雷器完全可以用来限制操作过电压, 也可以耐受一定持续时间的暂时过电压。

(4) 耐污性能好。由于没有串联间隙, 因而可避免因瓷套表面不均匀污染使串联火花间隙放电电压不稳定的问题。所以易于制造防污型和带电清洗型避雷器。

(5) 适于大批量生产, 造价低廉。由于省去了串联火花间隙, 所以结构简单, 元件单一通用, 特别适合大规模自动化生产。此外, 还具有尺寸小, 重量轻, 造价低廉等优点。

## 2. 氧化锌避雷器的基本电气参数

氧化锌避雷器与碳化硅避雷器的技术特性有许多不同点, 其参数及含义如下。

(1) 额定电压。是避雷器两端之间允许施加的最大工频电压有效值。即在系统短时工频过电压直接加在氧化锌阀片上时, 避雷器仍能正常地工作 (允许吸收规定的雷电及操作过电压能量, 特性基本不变, 不发生热崩溃)。它相当于 SiC 避雷器的灭弧电压, 但含义不同, 它是与热负载有关的量, 是决定避雷器各种特性的基准参数。

(2) 最大持续运行电压。是允许持续加在避雷器两端的最大工频电压有效值。避雷器吸收过电压能量后温度升高, 在此电压下能正常冷却, 不发生热击穿。它一般应等于系统最大工作相电压。

(3) 起始动作电压 (或参考电压)。它是指避雷器通过  $1\text{mA}$  工频电流峰值或直流电流时, 其两端之间的工频电压峰值或直流电压, 通常用  $U_{1\text{mA}}$  表示。该电压大致位于 ZnO 阀片伏安特性曲线由小电流区上升部分进入非线性区平坦部分的转折处, 所以也称为转折电压。从这一电压开始, 认为避雷器已进入限制过电压的工作范围。

(4) 残压。指放电电流通过 ZnO 阀片时, 其两端之间出现的电压峰值。包括三种放电电流波形下的残压。

陡波冲击电流下的残压 电流波形为  $1/5\mu\text{s}$ , 放电电流峰值为  $5\text{kA}$ ,  $10\text{kA}$ ,  $20\text{kA}$ ;

雷电冲击电流下的残压 电流波形为  $8/20\mu\text{s}$ , 标称放电电流为  $5\text{kA}$ ,  $10\text{kA}$ ,  $20\text{kA}$ ;

操作冲击电流下的残压 电流波形为  $30/60\mu\text{s}$ , 电流峰值为  $0.5\text{kA}$  (一般避雷器),  $1\text{kA}$  ( $330\text{kV}$  避雷器),  $2\text{kA}$  ( $500\text{kV}$  避雷器)。

## 3. 评价氧化锌避雷器性能优劣的指标

(1) 保护水平。氧化锌避雷器的雷电保护水平为雷电冲击残压和陡波冲击残压除以 1.15 中的较大者; 操作冲击保护水平等于操作冲击残压。

(2) 压比。指氧化锌避雷器通过波形为  $8/20\mu\text{s}$  的标称冲击放电电流时的残压与起始动作电压的比值。例如  $10\text{kA}$  下的压比为  $U_{10\text{kA}}/U_{1\text{mA}}$ 。压比越小, 表示非线性越好, 通过冲击

大电流时的残压越低，避雷器的保护性能越好。目前的产品水平约为 1.6~2。

(3) 荷电率。它表征单位电阻阀片上的电压负荷，是氧化锌避雷器的持续运行电压峰值与起始动作电压之比。荷电率愈高说明避雷器稳定性愈好，耐老化，能在靠近“转折点”长期工作。荷电率一般采用 45%~75%或更大。在中性点不接地或经消弧线圈接地系统中，因单相接地时健全相电压升高较大，所以一般选用较低的荷电率。在中性点直接接地系统中，工频电压升高不突出，可采用较高的荷电率。

(4) 保护比。氧化锌避雷器的保护比定义为标称放电电流下的残压与最大持续运行电压峰值的比值或压比与荷电率之比，即

保护比 =  $\frac{\text{标称放电电流下的残压}}{\text{最大持续运行电压(峰值)}} = \frac{\text{压比}}{\text{荷电率}}$

因此，降低压比或提高荷电率可降低氧化锌避雷器的保护比。

目前生产的氧化锌避雷器在电压等级较低时大部分是采用无间隙的结构。对于超高电压或需大幅度降低压比时，则采用并联或串联间隙的方法。为了降低大电流时的残压而又不加大阀片在正常运行中的电压负担，以减轻氧化锌阀片的老化，往往也采用并联或串联间隙的方法。图 6-24 为带并联间隙的氧化锌避雷器原理图。

在正常情况下，间隙 G 不击穿，由 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 共同承担工作电压，荷电率较低。当雷电或操作过电压作用时，流过 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 的电流将迅速增加，R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 上的电压也随之增加，当 R<sub>2</sub> 上的电压达到一定值时，间隙 G 被击穿，R<sub>2</sub> 被短接，避雷器上的残压仅由 R<sub>1</sub> 决定。从而降低了残压，也降低了压比。

由于氧化锌避雷器有上述优点，因而发展潜力很大，是避雷器发展的主要方向，正在逐步取代传统的带间隙的碳化硅避雷器。

氧化锌避雷器的电气特性参数见表 6-4。

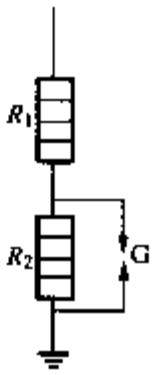


图 6-24 并联间隙氧化锌避雷器原理图

表 6-4 西安高压瓷厂氧化锌避雷器特性

产品型号	系统电压 (有效值) (kV)	额定电压 (有效值) (kV)	持续运行 电压 (有效值) (kV)	工频参考 电压 (kV)	8/20μs 雷电冲击残压 (峰值) (kV)			30/60μs 2kA 操作 冲击残压 (峰值) (kV)	1/5μs 10kA 陡波 冲击残压 (峰值) (kV)
					5kA	10kA	15kA		
Y5W5-12.7/45	10	12.7	6.6	21.5	45				
• Y5W5-14.0/50	10	14.0	6.6	23.9	50				
Y5W5-42/106	35	42.0	24.0	58.0	104	122			
• Y5W5-45/110	35	45.0	24.0	64.0	110	135			
•• Y5W5-56/142		56.0		78.0	142	164			
Y10W5-96/238	110	96	73	138		238	255		262
Y10W5-100/248	110	100	73	144		248	266		273
Y10W5-108/268	110	108	73	156		268	278		295
Y10W5-192/476	220	192	146	276		476	510	414	524
Y10W5-200/496	220	200	146	287		496	532	431	546
Y10W5-228/565	220	228	146	327		565	606	491	622
Y10W5-290/670	330	290	210	410		670	716	582	730
Y10W5-300/693	330	300	210	424		693	740	602	755

续表

产品型号	系统电压 (有效值) (kV)	额定电压 (有效值) (kV)	持续运行 电压 (有效值) (kV)	工频参考 电压 (kV)	8/20μs 雷电冲击残压 (峰值) (kV)			30/60μs 2kA 操作 冲击残压 (峰值) (kV)	1/5μs 10kA 陡波 冲击残压 (峰值) (kV)
					5kA	10kA	15kA		
Y10W5—312/720	330	312	210	441		720	770	626	785
Y10W5—396/896	500	396	318	560		896	967	736	930
Y10W5—420/950	500	420	318	594		950	1026	826	1045
Y10W5—444/995	500	444	318	628		995	1075	875	1095
Y10W5—468/1058	500	468	318	662		1058	1143	920	1165

注 \* 电容器组保护用。  
\* \* 保护 110kV 变压器中性点。

第五节 接 地 装 置

埋入地下与土壤有良好接触的金属导体称为接地体，连接接地体和电气装置接地部分的导线称为接地线。接地装置是接地体和接地线的总称，其作用是减小接地电阻，以降低雷电流通过时避雷针（线）或避雷器上的过电压。输配电系统中出于正常运行和人身安全等考虑，也要求装设接地装置以减小接地电阻。按照作用的不同，接地可分为工作接地、保护接地、防雷接地。

一、接地和接地电阻的基本概念

电位的高低是相对而言的，工程上需以零电位为参考点。考虑到大地是个导体，当其中没有电流流过时是等电位的，所以通常认为大地具有零电位，把它取作电位的参考点。如果

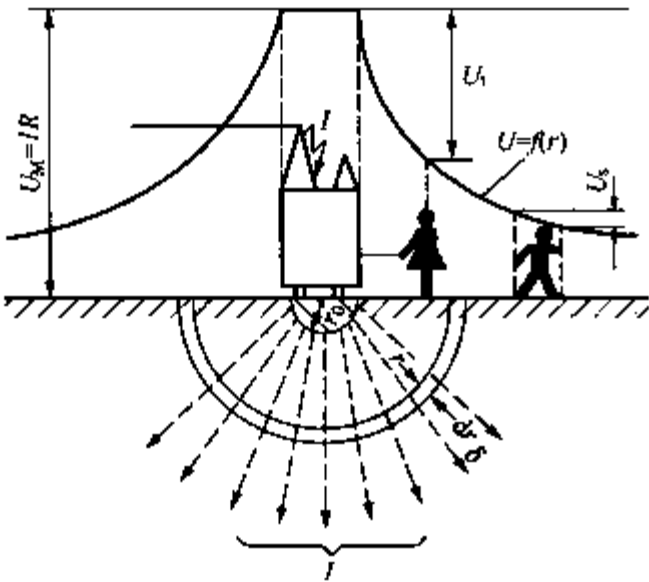


图 6 - 25 接地装置原理图  
 $U_M$ —接地点电位； $I$ —接地电流；  
 $U_i$ —接触电压； $U_s$ —跨步电压；  
 $U=f(r)$ —大地表面的电位分布曲线； $\delta$ —地中电流密度

地面上的金属物体与大地牢固连接，在没有电流流过时，金属物体与大地之间没有电位差，该物体就具有了大地的电位——零电位，这就是接地的含义。即接地就是指将地面上的金属物体或电气回路中的某一节点通过导体与大地相连，使该物体或节点与大地保持等电位。

实际上，大地并不是理想导体，它具有一定的电阻率，有电流流过时，大地则不再保持等电位。从地面上被强制流进大地的电流总是从一点注入的，但进入大地以后则以电流场的形式向四周扩散，则大地中呈现相应的电场分布，如图 6 - 25 所示。设土壤电阻率为  $\rho$ ，地中某点电流密度为  $\delta$ ，则该点电场强度  $E=\rho\delta$ 。离电流注入点愈远，地中电流密度愈小，电场强度愈弱。因此可以认为在相当远（或者叫无穷远）处，地中电流密度  $\delta$  已接近零，

电场强度  $E$  也接近零，该处仍保持零电位。由此可见，当接地点有电流流入大地时，该点相对于远处的零电位来说，具有确定的电位升高。图 6 - 25 中曲线  $U=f(r)$  表示地表面的

电位分布情况。

接地装置的接地电阻  $R$  等于接地点处的电位  $U_M$  与接地电流  $I$  的比值。当接地电流  $I$  为定值时，接地电阻愈小，则电位  $U_M$  愈低，反之愈高。此时地面上的接地物体也具有了电位  $U_M$ ，可能会危及到电气设备的绝缘以及人身安全。所以应尽可能地降低接地电阻。

## 二、工作接地、保护接地与防雷接地

电力系统中各种电气设备的接地可分为以下三种。

### 1. 工作接地

为了保证电力系统正常运行所需要的接地。例如系统中性点的接地，其作用是稳定电网的对地电位，以降低电气设备的绝缘水平。工作接地的接地电阻一般为  $0.5 \sim 5\Omega$ 。

### 2. 保护接地

为了保证人身安全，防止因设备绝缘损坏引发触电事故而采取的将高压电气设备的金属外壳接地。其作用是保证金属外壳经常固定为地电位，当设备绝缘损坏而使外壳带电时，不致有危险的电位升高造成人员触电事故。不过还要防止接触电压和跨步电压引起的触电事故。在正常情况下，接地点没有电流入地，金属外壳保持地电位，但当设备发生接地故障有电流通过接地体流入大地时，与接地点相连的设备金属外壳和附近地面的电位都会升高，有可能威胁到人身安全。

接触电压是指人所站立的地点与接地设备之间的电位差，如图 6-25 中的  $U_t$ 。人的两脚着地点之间的电位差称为跨步电压（取跨距为  $0.8\text{m}$ ），如图 6-25 中的  $U_s$ 。这些都有可能使通过人体的电流超过危险值（一般规定为  $10\text{mA}$ ），减小接地电阻或改进接地装置的结构形状可以降低接触电压和跨步电压，高压设备要求保护接地电阻值约为  $1 \sim 10\Omega$ 。

### 3. 防雷接地

针对防雷保护装置的需要而设置的接地。其作用是使雷电流顺利入地，减小雷电流通过时的电位升高。

对工作接地和保护接地来说，接地电阻是指工频或直流电流流过时的接地电阻，称为工频（或直流）接地电阻；当接地装置上流过雷电冲击电流时，所呈现的电阻称为冲击接地电阻（指接地体上的冲击电压幅值与冲击电流幅值之比）。雷电冲击电流与工频接地短路电流相比，具有幅值大、等值频率高的特点。

雷电流的幅值大，会使地中电流密度  $\delta$  增大，因而提高了地中的电场强度（ $E = \rho\delta$ ），当  $E$  超过一定值时，在接地体周围的土壤中会发生局部火花放电。火花放电使土壤电导增大，接地装置周围像被良好导电物质包围，相当于接地电极的尺寸加大，于是使接地电阻减小。当  $\rho$ 、 $\delta$  愈大时， $E$  也愈大，土壤中火花放电也愈强烈，冲击接地电阻值降低的也愈多。这一现象称为火花效应。

此外雷电流的等值频率高，会使接地体本身呈现明显的电感作用，阻碍雷电流流向接地体的远端，结果使接地体不能被充分利用，则冲击接地电阻大于工频接地电阻。这一现象称为电感效应。对于伸长接地体这种效应更显著。

由于上述原因，同一接地装置在冲击电流和工频电流作用下，将具有不同的电阻。两者之间的关系用冲击系数  $\alpha$  表示，即

$$\alpha = \frac{R_i}{R_g} \quad (6-15)$$

式中,  $R_g$  是工频接地电阻;  $R_i$  是冲击接地电阻。冲击系数  $\alpha$  与雷电流幅值、土壤电阻率  $\rho$  及接地体的几何尺寸等因素有关, 一般依靠实验确定, 也可参考图 6-26 决定。一般情况下, 火花效应的影响大于电感效应的影响, 故  $\alpha < 1$ ; 但对于伸长接地体来说, 其电感效应更明显, 则  $\alpha$  可能大于 1。

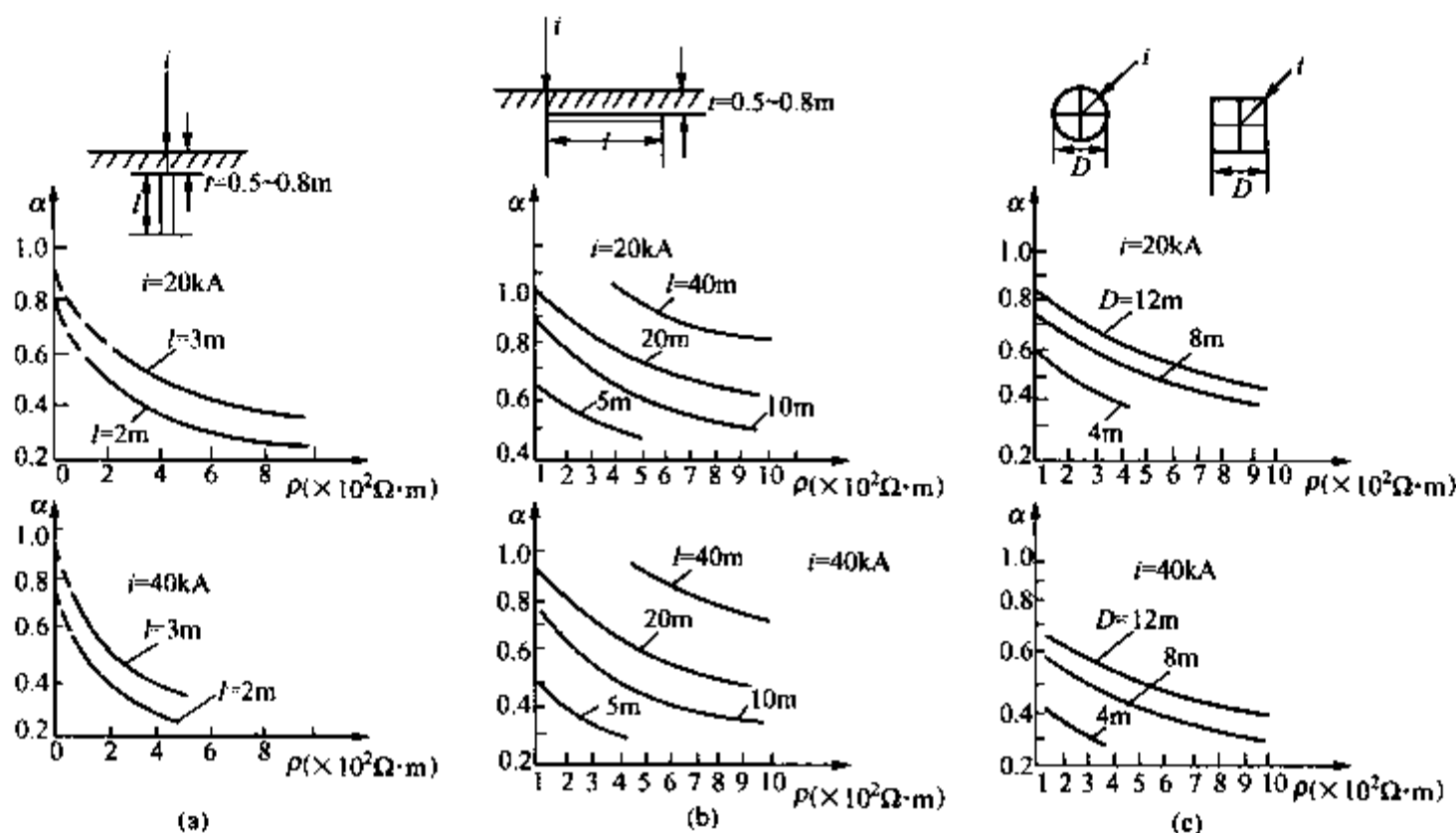


图 6-26 接地装置的冲击系数

(a) 垂直接地; (b) 水平接地; (c) 接地网

### 三、工程实用的接地装置

工程实用的接地体主要由扁钢、圆钢、角钢或钢管组成, 埋于地表面下 0.5~1m 处。水平接地体多用扁钢, 宽度一般为 20~40mm, 厚度不小于 4mm; 或者用直径不小于 6mm 的圆钢。垂直接地体一般用角钢 20×20×3mm~50×50×5mm 或钢管, 长度约取 2.5m。根据敷设地点不同, 又分为输电线路接地和发电厂及变电站接地。

#### 1. 典型接地体的接地电阻

(1) 垂直接地体。其接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\Omega) \quad (6-16)$$

式中,  $l$  是垂直接地体长度 (m);  $d$  是接地体直径 (m), 如图 6-27 所示。当采用扁钢时  $d=b/2$ ,  $b$  是扁钢宽度。当采用角钢时,  $d=0.84b$ ,  $b$  是角钢每边的宽度。

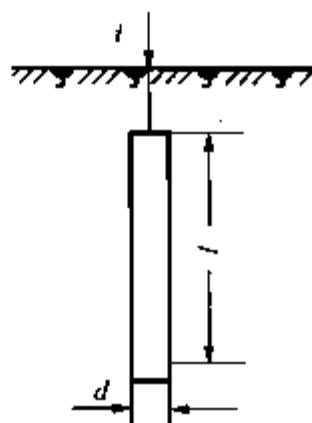


图 6-27 单根垂直接地体

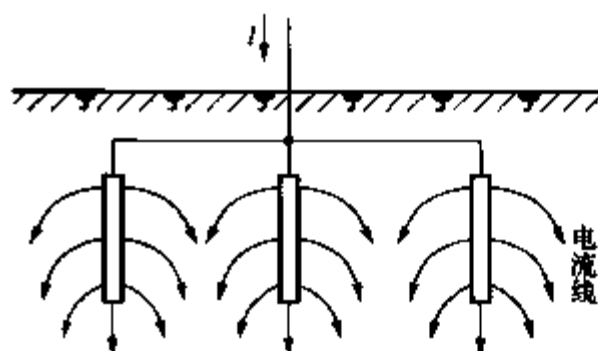


图 6-28 三垂直接地体的屏蔽效应

为了得到较小的接地电阻，接地装置往往由多个单一接地体并联组成，称为复式接地装置。在复式接地装置中，由于各接地体之间相互屏蔽的效应，以及各接地体与连接用的水平电极之间相互屏蔽的影响，使接地体的利用情况恶化，如图 6 - 28 所示。故总的接地电阻  $R_{\Sigma}$  要比  $R/n$  略大，可由下式计算

$$R_{\Sigma}=\frac{R}{\eta^n}$$

(6 - 17)

式中， $\eta$  为利用系数，表示由于电流相互屏蔽而使接地体不能充分利用的程度。一般  $\eta$  为 0.65~0.8， $\eta$  值与流经接地体的电流是工频或是冲击电流有关。

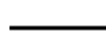







(2) 水平接地体。其电阻值为

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{L^2}{dh}+A\right)(\Omega)$$

(6 - 18)

式中， $L$  是水平接地体的总长度 (m)； $h$  是水平接地体埋设深度 (m)； $A$  表示因受屏蔽影响使接地电阻增加的系数，其数值见表 6 - 5。

表 6 - 5 水平接地体屏蔽系数 A

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
接地体形式								
屏蔽系数 A	-0.6	-0.18	0	0.48	0.89	1	3.03	5.65

以上公式计算出的是工频电流下的接地电阻即工频接地电阻。当流过雷电冲击电流时，其冲击接地电阻与工频接地电阻的关系通常用冲击系数  $\alpha$  表示，见式 (6 - 15)。

2. 输电线路的防雷接地

高压输电线路在每一基杆塔下都设有接地体，并通过引线与避雷线相连，其目的是使雷电流通过较低的接地电阻入地。

高压线路杆塔都有混凝土基础，它也起着接地体的作用（称为自然接地体）。一般情况下，自然接地电阻是不能满足要求的，需要装设人工接地装置。规程规定线路杆塔接地电阻值应满足表 6 - 6。

表 6 - 6 装有避雷线的线路杆塔工频接地电阻值（上限）

土壤电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	工频接地电阻 ( $\Omega$ )
100 及以下	10
100 以上至 500	15
500 以上至 1000	20
1000 以上至 2000	25
2000 以上	30，或敷设 6~8 根总长不超过 500m 的放射线，或用两根连续伸长接地线，阻值不作规定

3. 发电厂和变电站的接地

发电厂和变电站内有大量的重要设备，因此需要良好的接地装置，以满足工作、安全和防雷的要求。一般的作法是根据安全和工作接地的要求敷设一个统一的接地网，然后再在避雷针和避雷器安装处增加辅助接地体以满足防雷接地的要求。

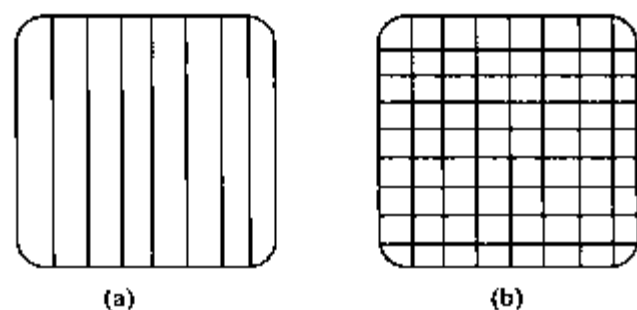


图 6-29 接地网示意图

(a) 长孔; (b) 方孔

接地网由扁钢水平连接, 埋入地下 0.6~0.8m 处, 其面积大体与发电厂和变电站的面积相同。接地网一般做成网孔形, 如图 6-29 所示, 其目的主要在于均压, 接地网中的两水平接地带的间距约 3~10m, 应按接触电压和跨步电压的要求确定。

接地网的总接地电阻  $R$  可按式估算

$$R = \frac{0.44\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (\Omega) \quad (6-19)$$

式中  $L$ ——接地体 (包括水平接地体与垂直接地体) 的总长度, m;

$\rho$ ——土壤电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$S$ ——接地网的总面积,  $\text{m}^2$ 。

发电厂和变电站的工频接地电阻值一般在 0.5~5 $\Omega$  的范围内, 这主要是为了满足工作接地及安全接地的要求。关于防雷接地的要求, 在变电站防雷保护时还要说明。

### 小 结

电气设备上产生的雷电过电压, 是由雷云对地放电而产生的。放电分为三个阶段: 先导放电、主放电及余辉放电。先导通道的发展具有“定向性”。

防雷装置主要有避雷针、避雷线和避雷器。避雷针和避雷线是防直击雷的主要措施, 在使用时应使需要保护的设施都处于避雷针 (线) 的保护范围之内。另外避雷针与被保护设施在空气中及地中必须保持足够的距离, 以防止反击事故的发生。避雷线对导线的屏蔽作用以避雷线的保护角表示。保护角越小, 保护性能越好。避雷器主要用来防止沿线侵入的雷电波, 限制作用在被保护设施上的过电压幅值。在使用时, 应注意避雷器的保护性能与被保护设施之间的绝缘配合问题, 选择合适的避雷器。此外, 避雷器也有保护范围, 与被保护设施之间的距离不能太远。

接地可分为工作接地、保护接地和防雷接地。当雷电流流过接地装置时, 在接地装置上会呈现火花效应和电感效应。其接地电阻值一般不同于工频接地电阻, 两者之间的关系用冲击系数表示。复式接地装置因各接地体间的相互屏蔽, 接地体的利用情况会恶化。

高压输电线路的每一基杆塔下都设有接地体, 其接地电阻应符合规程的要求。

发电厂和变电站一般是根据安全和工作接地的要求敷设一个统一的接地网, 在避雷针和避雷器安装处增加辅助接地体以满足防雷接地的要求。

### 习 题

6-1 雷电流、地面落雷密度是怎样定义的?

6-2 表征雷电流的几个主要参数是什么?

6-3 什么叫接地体的屏蔽效应?

6-4 某电厂的油罐直径 10m, 高出地面 10m, 需用独立避雷针保护, 针距罐至少 5m, 计算分别用单针、双针保护时避雷针的最低高度。

6-5 试全面比较阀型避雷器与氧化锌避雷器的性能。

## 第七章 输电线路的防雷保护

输电线路是电力系统的大动脉,担负着将电能从发电厂输送到各地用电中心的重要任务。由于线路长,地处旷野,因此极易遭受雷击。电力系统的雷害事故中,以线路的事故占大多数。雷击是造成线路跳闸的主要原因。同时,雷击线路时形成的雷电过电压波会沿线路侵入到变电站,危及变电站内电气设备的安全。加强输电线路的防雷是减少电力系统雷害事故的关键,因此,对输电线路的防雷保护应给予充分的重视。

输电线路防雷性能的优劣主要用耐雷水平和雷击跳闸率来衡量。耐雷水平是指线路遭受雷击时,线路绝缘所能耐受的不至于引起绝缘闪络的最大雷电流幅值,单位为 kA。耐雷水平愈高,线路的防雷性能愈好。雷击跳闸率是指在雷暴日数  $T_d=40$  的情况下,每 100km 线路每年由于雷击引起的跳闸次数,它是衡量线路防雷性能的综合指标。

### 第一节 输电线路的感应雷过电压

在雷云对地放电的过程中,由于放电通道周围空间电磁场的急剧变化,会在附近输电线路产生感应过电压。感应过电压包含静电感应和电磁感应两个分量,其形成过程如图 7-1 所示。

在雷电放电的先导阶段,当雷云接近输电线路上空时,线路处于雷云先导通道与大地构成的电场之中。根据静电感应的原理,导线轴线方向上的电场强度  $E_x$  将导线两端与雷云电荷异号的正电荷吸引到靠近先导通道的一段导线上,成为束缚电荷。导线上与雷云电荷同号的负电荷则由于  $E_x$  的排斥作用向两端运动,经线路的泄漏电导和系统的接地中性点

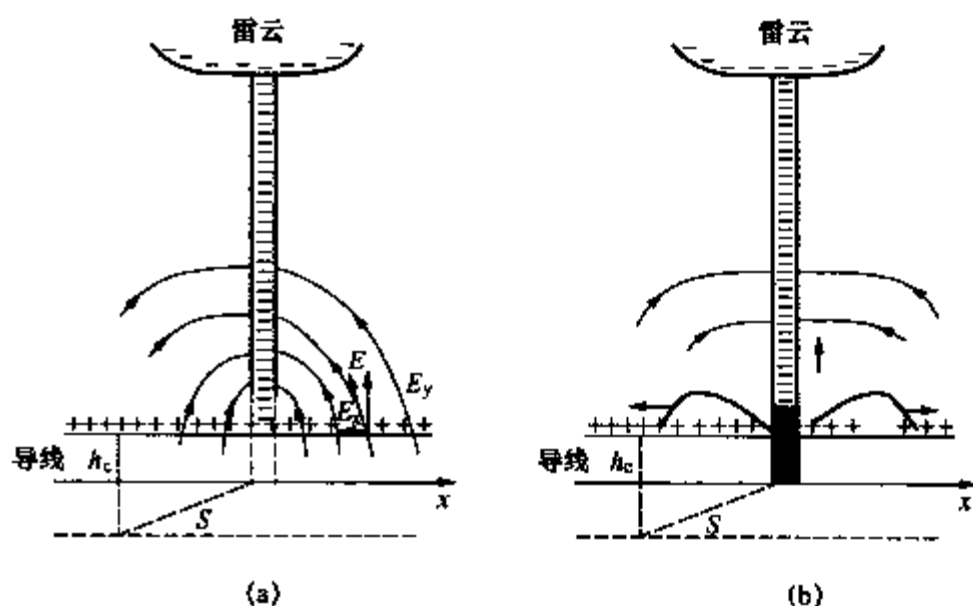


图 7-1 感应雷过电压形成示意图

(a) 主放电前; (b) 主放电后

$h_c$ —导线高度;  $S$ —雷击点与导线间的距离

流入大地。因为先导通道发展的平均速度较低,所以导线上束缚电荷的运动也较缓慢,由此在导线上引起的电流很小,相应的电压波  $u=iZ$  ( $Z$  是导线波阻抗) 也较小,可忽略不计。同时由于导线对地泄漏电导的存在,导线电位将与远离雷云处的导线电位相同。

主放电开始后,先导通道中的负电荷被迅速中和,先导通道所产生的电场迅速减弱,使导线上的正束缚电荷得到释放,沿导线向两侧运动形成感应雷过电压。这种由于先导通道中电荷所产生的静电场突然消失而引起的感应过电压称为感应过电压的静电分量。由于主放电的平均发展速度很高,导线上束缚电荷的释放过程也很快,所以形成的电压波  $u=iZ$  幅值很

高。与此同时,雷电通道中雷电流在通道周围空间建立了剧烈变化的磁场,使导线感应出很高的电压。这种由于先导通道中雷电流所产生的磁场变化而引起的感应过电压称为感应过电压的电磁分量。当雷击线路附近地面时,感应过电压的电磁分量比静电分量小得多,所以一般只考虑静电分量。

感应过电压的幅值与雷电流大小、雷电通道与线路间的距离以及导线的悬挂高度等因素有关。由于雷击地面时雷击点的自然接地电阻较大,所以雷电流幅值  $I$  一般不超过  $100\text{kA}$ 。实测证明,感应过电压一般不超过  $500\text{kV}$ ,对  $35\text{kV}$  及以下的水泥杆线路会引起闪络事故;对  $110\text{kV}$  及以上的线路,由于绝缘水平较高,一般不会引起闪络事故。

线路上的感应过电压具有以下特点:①感应过电压与雷电流的极性相反。由于大部分的雷云带负电荷,所以感应过电压大多数是正极性;②感应过电压同时存在于三相导线,相间不存在电位差,只能引起对地闪络,若二相或三相同时对地闪络,即形成相间闪络事故;③感应过电压的波形较平缓,波头由几  $\mu\text{s}$  到几十  $\mu\text{s}$ 。

### 一、雷击线路附近大地时导线上的感应过电压

感应过电压的静电分量和电磁分量的最大值都出现在距雷击点最近的一段导线上,根据理论分析和实测结果,规程建议,当雷击点离开线路的水平距离  $S > 65\text{m}$  时,导线上的感应过电压最大值  $U_i$  可按下式计算

$$U_i \approx 25 \frac{I h_c}{S} (\text{kV}) \quad (7-1)$$

式中  $I$ ——雷电流幅值,  $\text{kA}$ ;

$S$ ——雷击点与导线的水平距离,  $\text{m}$ ;

$h_c$ ——导线对地的平均高度,  $\text{m}$ 。

从式 (7-1) 可知,感应过电压与雷电流幅值  $I$  成正比,与导线悬挂的平均高度  $h_c$  成正比,  $h_c$  越高则导线对地电容越小,感应电荷产生的电压越高;感应过电压与雷击点到线路的距离  $S$  成反比,  $S$  越大,感应过电压越小。

如果导线上方挂有避雷线,由于接地避雷线的屏蔽效应,会使导线上的感应电荷减少,因而使导线上的感应过电压降低。避雷线的屏蔽作用可用下面的方法求得。

设导线和避雷线的对地平均高度分别为  $h_c$  和  $h_s$ ,若避雷线不接地,根据式 (7-1) 可求得导线和避雷线上的感应过电压分别为  $U_i$  和  $U_s$ ,即

$$U_i = 25 \frac{I h_c}{S}, U_s = 25 \frac{I h_s}{S}$$

所以

$$U_s = U_i \frac{h_s}{h_c}$$

但避雷线实际上是通过每基杆塔接地的,其电位为零。为了满足这一条件,可以设想在避雷线上又叠加一个  $(-U_s)$  的电压。而这个电压由于耦合作用,将在导线上产生耦合电压  $k(-U_s)$ ,  $k$  为避雷线与导线间的耦合系数,  $k$  值主要决定于导线间的相互位置与几何尺寸。于是,导线上方有避雷线时,导线上的实际感应过电压  $U'_i$  将为两者的叠加,即

$$U'_i = U_i - k U_s = U_i \left( 1 - k \frac{h_s}{h_c} \right) \approx U_i (1 - k) \quad (7-2)$$

上式表明,避雷线使导线上的感应过电压由  $U_i$  下降到  $U_i(1-k)$ 。耦合系数愈大,导线

上的感应过电压愈低。

二、雷击线路杆塔时，导线上的感应过电压

式（7-1）只适用于  $S>65\text{m}$  的情况，更近的落雷将会由于线路的引雷作用而击于线路。

雷击线路杆塔时，迅速向上发展的主放电引起周围空间电磁场的突然变化，将在导线上感应出与雷电流极性相反的过电压。一般高度的线路，无避雷线时导线上的感应过电压的最大值  $U_i$  可用下式计算

$$U_i = ah_c \tag{7-3}$$

式中  $h_c$ ——导线的平均高度，m；

$a$ ——感应过电压系数，kV/m，其值等于以  $\text{kA}/\mu\text{s}$  为单位的雷电流平均陡度，即  $a=I/2.6$ 。

有避雷线时，由于它的屏蔽作用，导线上的感应过电压将降低为

$$U'_i = (1-k)U_i = ah_c(1-k) \tag{7-4}$$

式中， $k$  为耦合系数。

第二节 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平

本节以中性点直接接地系统中有避雷线的线路为例，进行输电线路的直击雷过电压和耐雷水平的分析，其他线路分析的原则相同。

按照雷击线路部位的不同，雷直击于有避雷线的线路可分为三种情况，即雷击线路杆塔塔顶、雷击避雷线档距中央及雷绕过避雷线击于导线（称为绕击），如图 7-2 所示。

一、雷击杆塔塔顶时的过电压和耐雷水平

运行经验表明，在线路落雷总次数中，雷击杆塔的次数与避雷线的根数和经过地区的地形有关。

雷击杆塔的次数与雷击线路总次数的比值称为击杆率，用  $g$  表示。有关规程建议击杆率  $g$  如表 7-1 所示。

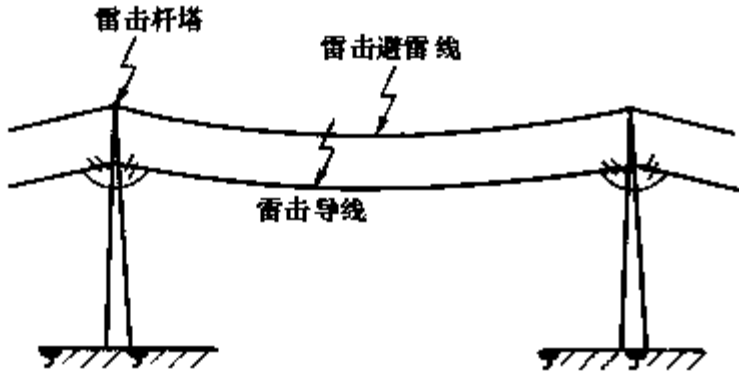


图 7-2 雷击输电线路部位示意图

表 7-1 击杆率 $g$			
地形	避雷线根数		
	0	1	2
平原	1/2	1/4	1/6
山区	—	1/3	1/4

如前所述，在雷击杆塔的先导放电阶段，导线、避雷线和杆塔上都会感应出异号束缚电荷，但由于先导放电发展的平均速度较慢，所以产生的电流及电压较小，可略去不计。若不计导线上的工频工作电压，则线路绝缘上不会出现电位差。在主放电阶段，雷电通道中的负电荷与杆塔、避雷线及大地中的正感应电荷迅速中和形成雷电流，雷电流的分布如图 7-3 所示。雷击瞬间自雷击点有一负极性的雷电流冲击波沿着杆塔向下运动，另有两个相同的负

极性雷电波沿避雷线向两侧运动，使塔顶电位升高，并通过电磁耦合使导线电位发生变化。与此同时，自雷击点有一正雷电冲击波沿雷电通道向上运动，引起周围空间电磁场的迅速变化，使导线上出现与雷电流极性相反的感应过电压。作用在线路绝缘子串上的电位差为塔顶电位与导线电位之差。当这一电位差超过绝缘子串的冲击放电电压时，绝缘子串闪络。

1. 塔顶电位

对于一般高度（40m 以下）的杆塔，在工程近似计算中，常将杆塔和避雷线以集中参数代替，这样雷击杆塔塔顶时的等值电路如图 7 - 4 所示。图中  $R_i$  为杆塔的冲击接地电阻， $L_t$  为杆塔的等值电感（不同类型杆塔的等值电感可由表 7 - 2 查得）， $i_t$  为经杆塔流入地中的电流， $L_s$  为避雷线的等值电感（两侧一档避雷线电感的并联值），单根避雷线的等值电感约为  $0.67l\mu\text{H}$ （ $l$  为档距长度，m），双避雷线约为  $0.42l\mu\text{H}$ 。

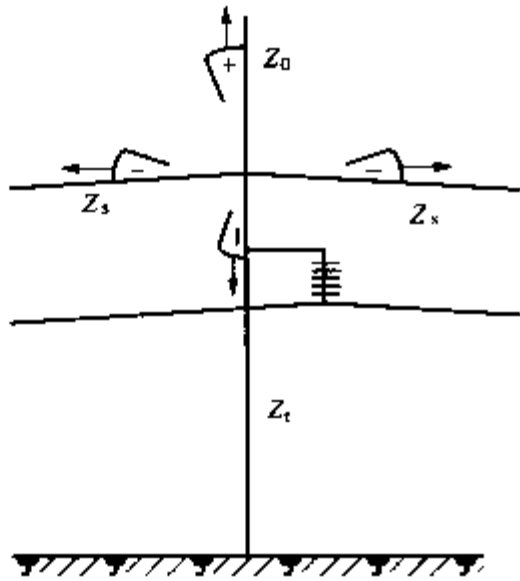


图 7 - 3 雷击杆塔塔顶时雷电流的分布

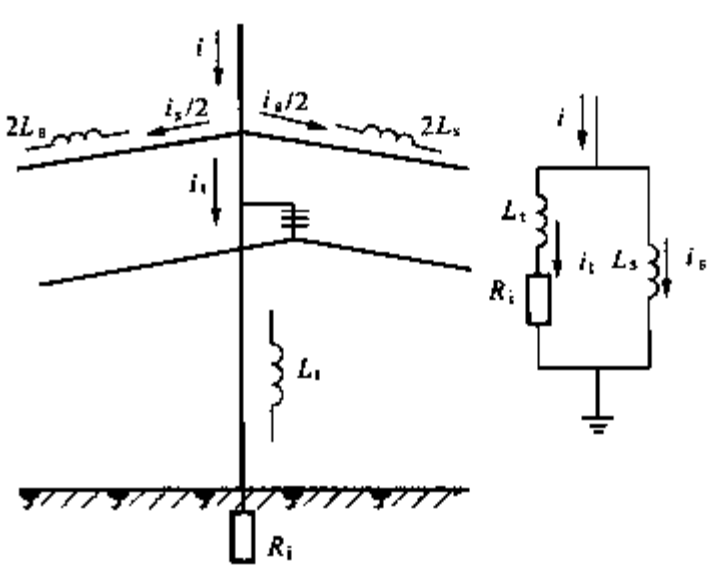


图 7 - 4 计算杆塔塔顶电位的等值电路

考虑到雷击点的对地阻抗较雷电通道波阻抗低得多，故在计算中可略去雷电通道波阻抗的影响，认为雷电流  $i$  直接由雷击点注入。由于避雷线的分流作用，流经杆塔的电流  $i_t$  将小于雷电流  $i$ ，其值可由下式计算

$$i_t = \beta i \tag{7 - 5}$$

式中， $\beta$  为分流系数，即流经杆塔的电流与雷电流之比。对于不同电压等级一般长度档距的杆塔， $\beta$  值可由表 7 - 3 查得，也可由图 7 - 4 所示的等值电路求出。

表 7 - 2 杆塔的等值电感和波阻抗的平均值

杆塔型式	杆塔电感 ( $\mu\text{H}/\text{m}$ )	杆塔波阻抗 ( $\Omega$ )
无拉线水泥单杆	0.84	250
有拉线水泥单杆	0.42	125
无拉线水泥双杆	0.42	125
铁塔	0.50	150
门型铁塔	0.42	125

表 7 - 3 一般长度档距的线路杆塔分流系数  $\beta$

线路额定电压 (kV)	避雷线根数	$\beta$ 值
110	1	0.90
	2	0.86
220	1	0.92
	2	0.88
330~500	2	0.88

雷击塔顶时，塔顶电位  $u_{\text{top}}$  可由下式计算

$$u_{\text{top}} = R_i i_t + L_t \frac{di_t}{dt} = \beta \left( R_i i + L_t \frac{di}{dt} \right) \tag{7 - 6}$$

式中,  $\frac{di}{dt}$  为雷电流波前陡度, 以  $\frac{di}{dt} = \frac{I}{2.6}$  代入上式, 则塔顶电位的幅值为

$$U_{\text{top}} = \beta I \left( R_i + \frac{L_i}{2.6} \right) \quad (7-7)$$

式中,  $I$  为雷电流幅值, kA。

## 2. 导线电位

当塔顶电位为  $U_{\text{top}}$  时, 与塔顶相连的避雷线上也有相同的电位  $U_{\text{top}}$ 。由于避雷线与导线间的耦合作用, 在导线上将产生耦合电压  $kU_{\text{top}}$ , 耦合电压与雷电流同极性。此外由前知, 雷击有避雷线的线路杆塔时, 由于静电感应和电磁感应, 在导线上还会出现幅值为  $ah_c(1-k)$  的感应过电压, 此电压与雷电流异极性。则导线电位的幅值  $U_c$  为

$$U_c = kU_{\text{top}} - ah_c(1-k) \quad (7-8)$$

## 3. 线路绝缘上的电压

作用在线路绝缘子串上的电压为塔顶电位与导线电位之差, 其幅值  $U_{L,i}$  为

$$U_{L,i} = U_{\text{top}} - U_c = U_{\text{top}} - kU_{\text{top}} + ah_c(1-k) = (U_{\text{top}} + ah_c)(1-k)$$

以  $a = \frac{I}{2.6}$  代入, 得

$$U_{L,i} = I \left( \beta R_i + \beta \frac{L_i}{2.6} + \frac{h_c}{2.6} \right) (1-k) \quad (7-9)$$

应当指出, 作用在线路绝缘上的电压还有导线的工作电压, 对 220kV 及以下的线路, 其值所占比重不大, 可略去; 但对超高压线路则不可不计, 雷击时导线上工作电压的瞬时值及其极性应作为一随机变量来考虑。

## 4. 雷击塔顶时的耐雷水平

从式 (7-9) 可知, 作用在线路绝缘上的电压幅值随雷电流增大而增大, 当  $U_{L,i}$  大于线路绝缘子串的冲击闪络电压时, 绝缘子串将发生闪络。由于此时杆塔电位较导线电位高, 故此类闪络称为“反击”。所以由  $U_{L,i} = U_{50\%}$  可求得雷击塔顶时的耐雷水平  $I_1$ , 即

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1-k) \left[ \beta \left( R_i + \frac{L_i}{2.6} \right) + \frac{h_c}{2.6} \right]} \quad (7-10)$$

从式 (7-10) 可知, 雷击杆塔时的耐雷水平与杆塔的等值电感  $L_i$ 、杆塔冲击接地电阻  $R_i$ 、分流系数  $\beta$ 、耦合系数  $k$  及绝缘子串的 50% 冲击放电电压  $U_{50\%}$  有关。在实际工程中, 通常以降低杆塔冲击接地电阻  $R_i$  和提高导线与避雷线间的耦合系数  $k$  的方法作为提高线路耐雷水平的主要手段。

对于一般高度的杆塔, 冲击接地电阻  $R_i$  上的电压降是塔顶电位的主要成分, 因此降低接地电阻可有效地减小塔顶电位和提高耐雷水平。增加耦合系数  $k$  可以减少绝缘子串上电压及感应过电压, 因此也可以提高耐雷水平。常用措施是将单避雷线改为双避雷线, 或在导线下方增设架空地线 (称为耦合地线), 既可增大耦合系数  $k$ , 又可增大地线的分流作用。

标准 DL/T620—1997 规定, 不同电压等级输电线路, 雷击杆塔时的耐雷水平  $I_1$  不应低于表 7-4 中的数值。

表 7-4 有避雷线线路的耐雷水平 (kA)

额定电压 (kV)	35	60	110	220	330	500
一般线路	20~30	30~60	40~75	75~110	100~150	125~175
大跨越档距中央和发电厂、变电站进线保护段	30	60	75	110	150	175

二、雷击避雷线档距中央时的过电压

据模拟试验和实际运行经验，这种雷击线路的情况出现的概率约有 10%。雷击避雷线档距中央时，在雷击点会产生很高的过电压。不过由于避雷线的半径较小，雷击点距杆塔较远，强烈的电晕使过电压波传播到杆塔时已衰减得较小，不足以使绝缘子串闪络，所以通常只考虑雷击点处避雷线对导线的反击问题。

雷击避雷线档距中央时的波过程如图 7-5 所示。雷击点处波阻抗为  $Z_s/2$  ( $Z_s$  为避雷线波阻抗)，根据式 (6-2)，流入雷击点的雷电流  $i_z$  为

$$i_z = i \frac{Z_0}{Z_0 + Z_s/2} \tag{7-11}$$

式中， $Z_0$  为雷电通道波阻抗。则雷击点电压  $u_A$  为

$$u_A = i_z \cdot \frac{Z_s}{2} = i \frac{Z_0 Z_s}{2Z_0 + Z_s} \tag{7-12}$$

此电压波  $u_A$  自雷击点向两侧避雷线传播，当到达两侧接地的杆塔处时，将发生负反射，负反射波需要一段时间才能回到雷击点使该点电位降低。在此期间雷击点处避雷线上会有较高的电位。设档距长度为  $l$ ，避雷线上的波速为  $v_s$ ，则电压波  $u_A$  经  $l/2v_s$  时间到达杆塔，负反射波又经  $l/2v_s$  返回雷击点，若此时雷电流尚未到达幅值，即  $2 \times l/2v_s$  小于雷电流波头，则雷击点的电位自负反射波到达之时开始下降，故雷击点的最高电位将出现在  $t = 2 \times l/2v_s = l/v_s$  时刻。

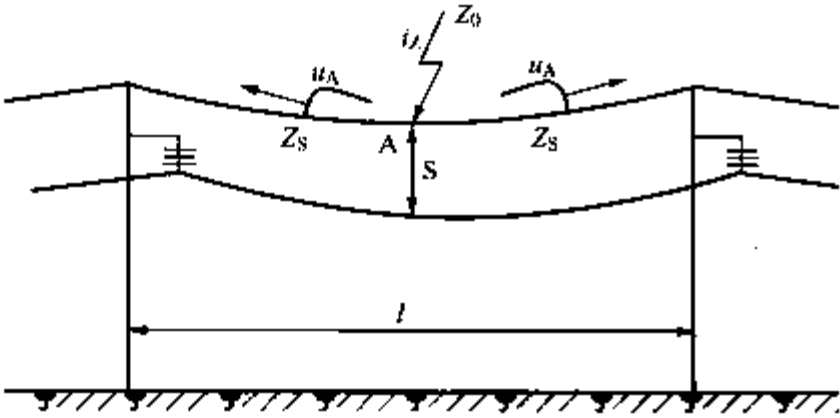


图 7-5 雷击避雷线档距中央时波过程示意图  
 $Z_0$ —雷电通道波阻抗； $S$ —档距中央导线与避雷线间距离

若雷电流取为斜角波头，即  $i = at$ ，根据式 (7-12)，以  $t = l/v_s$  代入，则雷击点的最高电位  $U_A$  为

$$U_A = a \times \frac{l}{v_s} \times \frac{Z_0 Z_s}{2Z_0 + Z_s}$$

由于避雷线与导线间的耦合作用，在导线上将产生耦合电压  $kU_A$ ，所以雷击处避雷线与导线间的空气间隙  $S$  上所承受的最大电压  $U_s$  为

$$U_s = (1 - k)U_A = a \times \frac{l}{v_s} \times \frac{Z_0 Z_s}{2Z_0 + Z_s} (1 - k) \tag{7-13}$$

从式 (7-13) 可知， $U_s$  与耦合系数  $k$ 、雷电流陡度  $a$  及档距长度  $l$  有关，当  $U_s$  超过空气间隙  $S$  的 50% 冲击放电电压  $U_{50\%}$  时，间隙被击穿，将造成系统接地事故。

根据式 (7-13) 及线路档距长度  $l$ 、空气间隙的冲击耐电强度，可以计算出不发生击穿的最小允许空气距离  $S$ 。经过我国多年运行经验的修正，规程提出：对于一般档距的线路，

在档距中央导线和避雷线之间的空气距离  $S$  宜按下述经验公式确定

$$S = 0.012l + 1(\text{m}) \quad (7-14)$$

式中,  $l$  为档距长度,  $\text{m}$ 。

在线路防雷的工程计算中, 只要导线与避雷线间的空气距离满足式 (7-14) 的要求, 雷击避雷线档距中央引起的线路跳闸可以忽略不计。

对于大跨越档距, 若  $l/v_s$  大于雷电流波头, 则来自接地杆塔的负反射波回到雷击点之前, 雷电流已过峰值, 故雷击点的最高电位由雷电流峰值决定。导线与避雷线间的距离  $S$  将由雷击点的最高电位和间隙平均击穿场强所决定。

### 三、绕击时的过电压和耐雷水平

对于装设有避雷线的输电线路, 由于各种随机因素的影响, 可能会使避雷线的屏蔽保护失效, 仍可能发生雷绕过避雷线击中导线的情况 (即绕击), 如图 7-6 所示。虽然绕击的概率很小, 但一旦发生则往往会引起线路绝缘子串的闪络。

绕击率  $P_a$  与避雷线的保护角  $\alpha$ 、杆塔高度  $h$  以及线路经过地区的地形、地貌和地质条件等因素有关。对于一般实际工程问题, 往往采用从模拟试验和现场运行经验中得出的经验公式计算绕击率, 标准建议用下列公式计算绕击率  $P_a$ 。

$$\text{对平原地区线路} \quad \lg P_a = \frac{\alpha \sqrt{h}}{86} - 3.9 \quad (7-15)$$

$$\text{对山区线路} \quad \lg P_a = \frac{\alpha \sqrt{h}}{86} - 3.35 \quad (7-16)$$

式中  $P_a$ ——绕击概率, 指一次雷击线路中出现绕击的概率;

$\alpha$ ——保护角,  $^\circ$ ;

$h$ ——杆塔高度,  $\text{m}$ 。

从上两式可知, 山区的绕击率约为平原地区的 3 倍, 或相当于保护角增大  $8^\circ$  的情况。从减少绕击率的观点出发, 应尽量减少保护角。

雷击导线时, 雷电流将沿导线向两侧流动, 雷击点的阻抗为  $Z_c/2$ , 即雷击点两侧导线波阻抗  $Z_0$  的并联值。根据式 (6-2), 流经雷击点的雷电流波  $i_z$  为

$$i_z = i \frac{Z_0}{Z_0 + \frac{Z_c}{2}} \quad (7-17)$$

导线上电压  $u_c$  为

$$u_c = i_z \cdot \frac{Z_c}{2} = i \frac{Z_0 Z_c}{2Z_0 + Z_c}$$

其幅值  $U_c$  为

$$U_c = I \frac{Z_0 Z_c}{2Z_0 + Z_c} \quad (7-18)$$

由式 (7-18) 知, 绕击时导线上电压幅值  $U_c$  随雷电流幅值  $I$  的增加而增加。如果  $U_c$  超过线路绝缘子串的冲击放电电压, 绝缘子串就会闪络。

在近似计算中, 认为  $Z_0 \approx Z_c/2$ , 即不考虑雷击点的反射, 则上式可变为

$$U_c = \frac{Z_c}{4} \cdot I$$

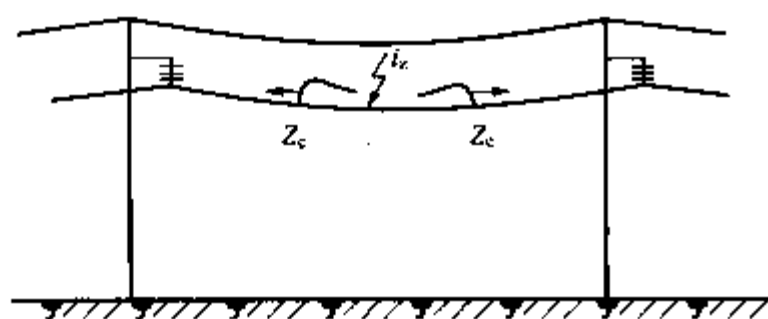


图 7-6 绕击导线

因为架空线路波阻抗  $Z_c$  近似等于  $400\Omega$ , 令  $U_c$  等于线路绝缘子串的 50% 冲击放电电压, 则绕击时的耐雷水平  $I_2$  为

$$I_2 \approx \frac{U_{50\%}}{100} \quad (7-19)$$

由式 (7-19) 可以看出, 绕击时, 线路的耐雷水平很低。对 110kV、220kV、330kV 电

压等级的输电线路, 雷绕击导线的耐雷水平分别只有 7kA、12kA 和 16kA 左右, 对 500kV 电压等级的线路其耐雷水平也只有 27.5kA 左右。因此, 对于 110kV 及以上中性点直接接地系统的输电线路, 一般要求全线架设避雷线, 以防止线路频繁发生雷击闪络跳闸事故。

### 第三节 输电线路的雷击跳闸率

雷电过电压导致输电线路跳闸需要同时具备两个条件: 首先, 雷电流必须超过线路耐雷水平, 引起线路绝缘发生冲击闪络; 其次, 冲击闪络转变为稳定的工频电弧。由于雷电流持续时间很短 (只有几十微秒), 所以冲击闪络时线路开关来不及跳闸, 因此只有同时满足第二个条件, 继电保护装置才会动作, 使线路跳闸停电。

#### 一、建弧率

冲击闪络转变为稳定工频电弧的概率, 称为建弧率, 以  $\eta$  表示。冲击闪络能否转变为稳定的工频电弧主要取决于工频弧道中的平均电场强度 (即沿绝缘子串或空气间隙的平均运行电压梯度)  $E$ , 还取决于闪络瞬间工频电压的瞬时值以及去游离强度等条件。建弧率可按下列式计算

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad (7-20)$$

式中,  $E$  为绝缘子串的平均运行电压梯度 [kV (有效值) / m]。

对中性点直接接地系统

$$E = \frac{U_N}{\sqrt{3}l_i} \quad (7-21)$$

对中性点绝缘或经消弧线圈接地系统

$$E = \frac{U_N}{2l_i + l_m} \quad (7-22)$$

式中  $U_N$ ——系统额定电压 (有效值), kV;

$l_i$ ——绝缘子串的放电距离, m;

$l_m$ ——木横担线路的线间距离, 对铁横担和钢筋混凝土横担线路,  $l_m=0$ 。

对于中性点不接地系统, 单相闪络不会引起跳闸, 只有当第二相导线闪络后才会造成相间闪络而跳闸, 所以式 (7-22) 中应是线电压和相间绝缘长度。

实践证明, 当  $E \leq 6$  kV (有效值) / m 时, 建弧率很小, 可以近似地认为建弧率  $\eta=0$ 。

#### 二、线路落雷次数

雷击输电线路的跳闸次数与线路可能受雷击的次数有关。

输电线路高出地面, 有引雷作用, 其引雷范围与线路高度有关。线路愈高, 等效受雷面

积愈大。根据模拟试验和运行经验,一般高度线路的等效受雷面宽度为  $b+4h_s$ 。则每 100km 线路年落雷次数  $N$  可以下式计算

$$N = \gamma \times 100 \times \frac{b+4h_s}{1000} \times T_d \quad [\text{次}/(100\text{km} \cdot \text{年})] \quad (7-23)$$

式中  $T_d$ ——雷暴日数;

$b$ ——两根避雷线之间的距离, m, 若为单根避雷线, 则  $b=0$ ; 若无避雷线, 则  $b$  为边相导线间的距离;

$h_s$ ——避雷线的平均对地高度, m, 可按式 (7-24) 求得, 无避雷线时为最上层导线的平均高度。

避雷线平均对地高度计算式为

$$h_s = h_i - \frac{2}{3}f \quad (7-24)$$

式中  $h_i$ ——避雷线在杆塔上的悬挂点高度, m;

$f$ ——避雷线的弧垂, m。

取  $T_d=40$  时,  $\gamma=0.07$ , 则

$$N = 0.28(b+4h_s) \quad (7-25)$$

### 三、有避雷线线路雷击跳闸率 $n$ 的计算

#### 1. 雷击杆塔时的跳闸率 $n_1$

每 100km 有避雷线的线路每年 (40 个雷暴日) 落雷次数为  $N=0.28(b+4h_s)$  次。若击杆率为  $g$ , 则每 100km 线路每年雷击杆塔次数为  $0.28(b+4h_s)g$  次。若雷电流幅值大于雷击杆塔时的耐雷水平  $I_1$  的概率为  $P_1$ , 建弧率为  $\eta$ , 则每 100km 线路每年因雷击杆塔的跳闸次数  $n_1$  为

$$n_1 = 0.28(b+4h_s)\eta g P_1 \quad (7-26)$$

#### 2. 绕击跳闸率 $n_2$

设线路的绕击率为  $P_a$ , 则每 100km 线路每年绕击次数为  $0.28(b+4h_s)P_a$ , 雷电流幅值超过绕击耐雷水平  $I_2$  的概率为  $P_2$ , 建弧率为  $\eta$ , 则每 100km 线路每年的绕击跳闸次数为

$$n_2 = 0.28(b+4h_s)\eta P_a P_2 \quad (7-27)$$

#### 3. 线路雷击跳闸率

根据运行经验, 只要避雷线与导线之间的空气距离满足式 (7-14), 则雷击避雷线档距中央时一般不会发生击穿事故, 故其跳闸率为零。

所以线路雷击跳闸率只考虑雷击杆塔和雷绕击于导线两种情况。综上所述, 有避雷线的线路, 雷击总跳闸率为

$$n = n_1 + n_2 = 0.28(b+4h_s)\eta(gP_1 + P_a P_2) \quad [\text{次}/(100\text{km} \cdot \text{年})] \quad (7-28)$$

## 第四节 输电线路的防雷保护措施

在确定输电线路的防雷保护方式时, 应综合考虑系统的运行方式、线路的电压等级和重要程度、已有线路的运行经验、线路经过地区雷电活动的强弱、地形地貌的特点、土壤电阻率的高低等条件, 根据技术经济比较的结果, 因地制宜采取合理的保护措施。



水平提高而不再发生闪络，以保证线路继续供电。两回线路绝缘水平相差多少，应以各方面技术经济比较来确定。一般认为两回路绝缘水平的差异宜为 $\sqrt{3}$ 倍相电压（峰值），差异过大将使线路的总跳闸率增加。

#### 5. 采用消弧线圈接地方式

在雷电活动强烈、接地电阻又难以降低的地区，对于110kV及以下电压等级的电网可采用系统中性点不接地或经消弧线圈接地的方式。这样绝大多数的雷击单相闪络接地故障能被消弧线圈所消除，不至于发展成为持续工频电弧。在两相或三相受雷时，雷击引起第一相导线闪络并不会造成跳闸，先闪络的导线相当于地线，增加了分流和对未闪络相的耦合作用，使未闪络相绝缘上的电压下降，从而提高了线路的耐雷水平。

#### 6. 装设自动重合闸装置

由于线路绝缘具有自恢复性能，大多数雷击造成的冲击闪络在线路跳闸后能够自行消除。所以，安装自动重合闸装置对降低线路的雷击事故率效果较好，各级电压的线路都应装设自动重合闸装置。

#### 7. 装设排气式避雷器

在我国跳闸率比较高的地区，高压线路的总跳闸次数中，由于雷击引起的跳闸次数约占到40%~70%。为了减少输电线路的雷害事故，提高供电的可靠性，可在线路雷电活动强烈或土壤电阻率很高的线段及线路绝缘薄弱处装设排气式避雷器。一般在线路交叉处和大跨越高杆塔等处装设。

#### 8. 加强绝缘

对于线路的个别大跨越高杆塔地段，落雷机会增多，杆塔的等值电感大，感应过电压高，绕击的概率也随高度的增大而增加，这些都增加了线路的雷击跳闸率。为降低跳闸率，可在高杆塔上增加绝缘子串的片数，加大大跨越档导线与避雷线之间的距离，以加强线路绝缘。规程规定，全高超过40m有避雷线的杆塔，每增高10m应增加一片绝缘子；全高超过100m的杆塔，绝缘子串的片数应结合运行经验通过计算确定。

## 小 结

输电线路防雷性能的优劣主要用耐雷水平和雷击跳闸率来衡量。

对输电线路的防雷保护，应根据输电线路电压等级的高低、输送容量的大小、所处地区雷电活动的强弱、地形地貌的特点等条件采取合理的保护措施，将线路的雷击跳闸率降到合理的水平，保证供电的可靠性。

输电线路的防雷应遵循以下的原则：首先应防止雷击导线。采取的措施是沿线路架设避雷线，且避雷线的保护角不宜过大。其次，应防止避雷线受雷击后引起绝缘闪络，即所谓反击。措施有改善避雷线的接地，适当加强绝缘，个别杆塔还可使用避雷器。第三，防止雷击闪络后建立稳定的工频短路电弧。相应的措施有：①适当增加绝缘子的片数以减小绝缘子串的工频电场强度；②电网中性点采用不接地或经消弧线圈接地，当线路绝缘发生单相对地冲击闪络时，电弧能自行熄灭。第四，防止线路中断供电。为了使线路跳闸后，也能保证不中断供电，可采用自动重合闸或双回路、环网供电等措施。

## 习 题

7-1 为什么要重视输电线路的防雷保护? 线路上的大气过电压有哪几种?

7-2 雷击离 35kV 输电线路 70m 处的照明塔, 记录到雷电流幅值为 80kA。输电线在杆塔上的悬挂点高度是 12m, 弧垂是 4.5m, 求导线上的感应过电压值。若同样大小的雷电流击中线路的杆塔, 设波头长度为  $2.6\mu\text{s}$ , 计算此时导线上的感应雷过电压分量。

7-3 直击雷过电压是怎样形成的?

7-4 输电线路的耐雷水平和雷击跳闸率各是什么含意?

7-5 如何提高输电线路的耐雷水平?

7-6 试说明避雷线在输电线路防雷保护中的作用。

7-7 输电线路防雷的基本措施有哪些?

## 第八章 发电厂、变电站的防雷保护

发电厂、变电站是电力系统的重要组成部分,发电机、变压器、断路器等一些重要设备都安装在这里,由于这些设备的内绝缘大都没有自恢复功能,如果发生雷击事故,可能会使这些设备损坏,修复起来较困难,所以后果十分严重,会造成大面积的停电,严重影响国民经济和人民生活。因此,必须采取可靠的防雷保护措施。

发电厂、变电站的雷害事故可来自两个方面:一是雷直击发电厂、变电站;二是雷击输电线路产生的雷电波沿线路侵入发电厂和变电站。

对直击雷的防护一般采用避雷针或避雷线。

由于线路落雷机会远比变电站多,所以沿线路侵入的雷电波是造成发电厂、变电站雷害事故的主要原因。因线路的绝缘水平高于发电厂、变电站电气设备的绝缘水平,使沿线路侵入的雷电波幅值往往较高,若不采取防护措施,会造成发电厂、变电站内的电气设备损坏。对入侵波防护的主要措施是在发电厂、变电站内安装阀型避雷器或氧化锌避雷器,以限制电气设备上的过电压幅值;同时在发电厂、变电站的进线段上采取相应措施,以限制流过避雷器的雷电流和降低侵入波的陡度,从而将发电厂、变电站电气设备上的过电压幅值限制在电气设备的雷电冲击耐受电压以下。对直接与架空线路相连的发电机(一般称为直配电机),除了在发电机母线上装设避雷器外,还应装设电容器以降低侵入波陡度,使发电机的匝间绝缘和中性点绝缘不受损坏。

### 第一节 直击雷过电压的防护

发电厂、变电站防止雷直击的措施是采用避雷针(线)及良好的接地网。装设的避雷针(线)应使所有设备均处于避雷针或避雷线的保护范围之内,以免受到直接雷击。需要保护的设施主要有:屋外配电装置;火力发电厂的烟囱、冷却塔和输煤系统的高大建筑物;油处理室、易燃材料仓库等建筑物。当雷击于避雷针后,它们的对地电位可能很高,如果它们与被保护设备之间的距离不够大,则有可能在避雷针、避雷线与被保护设备之间发生放电,这种现象称为避雷针(线)对电气设备的反击,或叫作逆闪络。反击可能在空气中发生,也可能在地下接地装置间发生。发生反击时,高电位就将加到电力设备上,有可能导致电力设备的绝缘损坏。所以,在设置避雷针时还应注意防止反击事故的发生。

关于避雷针、避雷线保护范围的计算在第六章中已作过介绍,这里着重讨论如何避免反击事故的发生。

按照安装方式的不同,避雷针可分为独立避雷针和架构避雷针两类。

当雷击独立避雷针、雷电流流过避雷针和接地装置时,在避雷针上将会出现很高的电位。如图 8-1 所示。设避雷针在高度为  $h$  处的电位为  $u_a$ , 接地装置上的电位为  $u_e$ , 则

$$u_a = iR_i + L_0 h \frac{di}{dt} \quad (8-1)$$

$$u_c = iR_i \quad (8-2)$$

式中  $R_i$  — 避雷针的冲击接地电阻,  $\Omega$ ;

$L_0$  — 避雷针单位高度的等值电感,  $\mu\text{H}/\text{m}$ ;

$h$  — 避雷针校验点的高度,  $\text{m}$ ;

$i$  — 流过避雷针的雷电流,  $\text{kA}$ ;

$\frac{di}{dt}$  — 雷电流的陡度,  $\text{kA}/\mu\text{s}$ 。

若取空气间隙的平均击穿场强为  $E_a$  ( $\text{kV}/\text{m}$ ), 为防止避雷针对架构或被保护设备发生反击, 其空气间隙  $S_a$  应满足下式要求

$$S_a \geq \frac{u_a}{E_a} \quad (8-3)$$

同理, 若土壤的平均击穿场强为  $E_c$  ( $\text{kV}/\text{m}$ ), 为了防止避雷针的接地装置与被保护设备的接地装置之间的土壤击穿造成反击, 其地中距离  $S_c$  应满足下式要求

$$S_c \geq \frac{u_c}{E_c} \quad (8-4)$$

根据以上各式, 并考虑实际运行经验, 我国标准推荐用下面两个公式校核独立避雷针与被保护设备之间的空气距离  $S_a$  和地中距离  $S_c$ 。

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1h \quad (8-5)$$

$$S_c \geq 0.3R_i \quad (8-6)$$

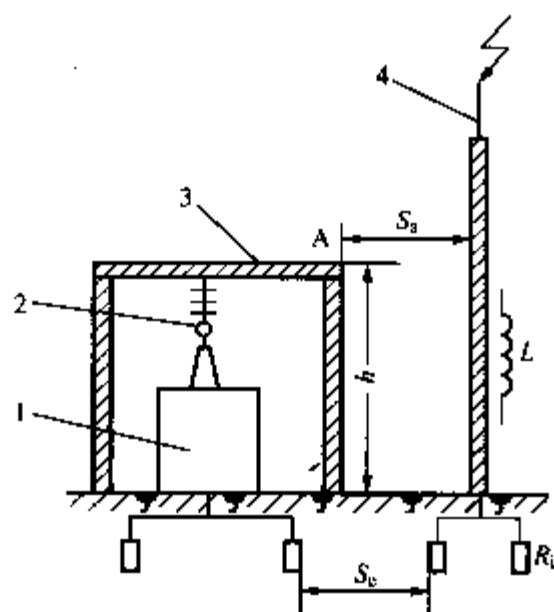


图 8-1 独立避雷针距配电构架的距离

1—变压器; 2—母线;

3—配电构架; 4—避雷针

从式 (8-5)、式 (8-6) 可以看出, 当避雷针的接地电阻过大时,  $S_a$ 、 $S_c$  都将增大, 从而使避雷针的高度也增加, 这在经济上不合理。所以, 在一般土壤中避雷针 (线) 的工频接地电阻不宜大于  $10\Omega$ 。

架构避雷针具有节约投资, 便于布置的优点, 所以可充分利用变电站内的建筑物设置架构避雷针。但因架构离电气设备较近, 所以更应注意防止反击事故的发生。对  $110\text{kV}$  及以上的配电装置, 由于电气设备的绝缘水平较高, 雷击避雷针时在配电架构上出现的高电位一般不会造成反击事故, 可将避雷针装设在配电装置的架构上。但在土壤电阻率较大的地区 ( $\rho > 1000\Omega \cdot \text{m}$ ), 宜装设独立避雷针。对  $35\text{kV}$  及以下的配电装置, 因其绝缘水平较低, 为了防止反击事故, 其架构或房顶上不宜装设避雷针, 应由独立避雷针

保护。

变压器的绝缘较弱, 又是变电站中最贵重的设备, 所以变压器的门型架构上, 不宜装设避雷针 (线)。发电厂的主厂房一般不装设避雷针, 以免发生感应或反击使继电保护误动作或造成绝缘损坏。

架构避雷针的接地是利用发电厂、变电站的主接地网, 但应在其附近装设辅助集中接地装置, 并且架构避雷针与主接地网的地下连接点至变压器的接地线与主接地网的地下连接点之间, 沿接地体的长度不得小于  $15\text{m}$ 。

对于变电站的直击雷防护,我国大多数采用的是避雷针,近年来国内外新建的 500kV 变电站也有采用避雷线进行保护的。据国内外多年运行经验表明,采用避雷线保护发电厂、变电站时,只要结构布置合理,设计参数选择正确,避雷线有足够的截面和机械强度,可以得到很好的防雷效果。

采用架空避雷线保护的布置形式有两种:一种是避雷线一端经配电装置架构接地,另一端经绝缘子串与厂房建筑物绝缘,如图 8-2 所示;另一种是避雷线两端都接地,如图 8-3 所示。例如将变电站进线的避雷线延伸至变电站内,通过架构接地并形成一个架空地网。

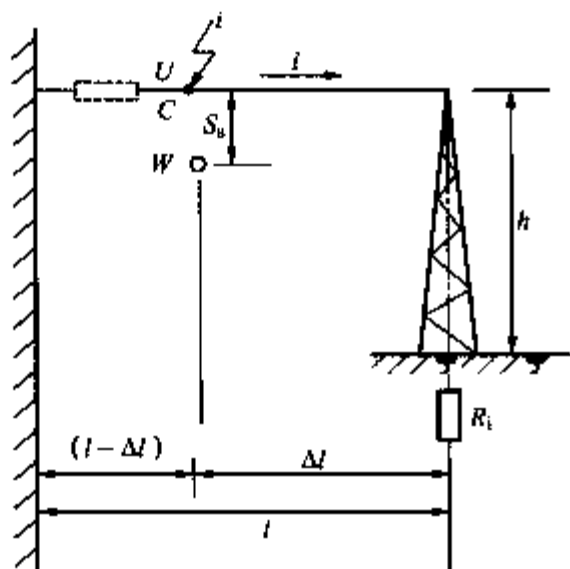


图 8-2 雷击一端绝缘的避雷线时的计算图

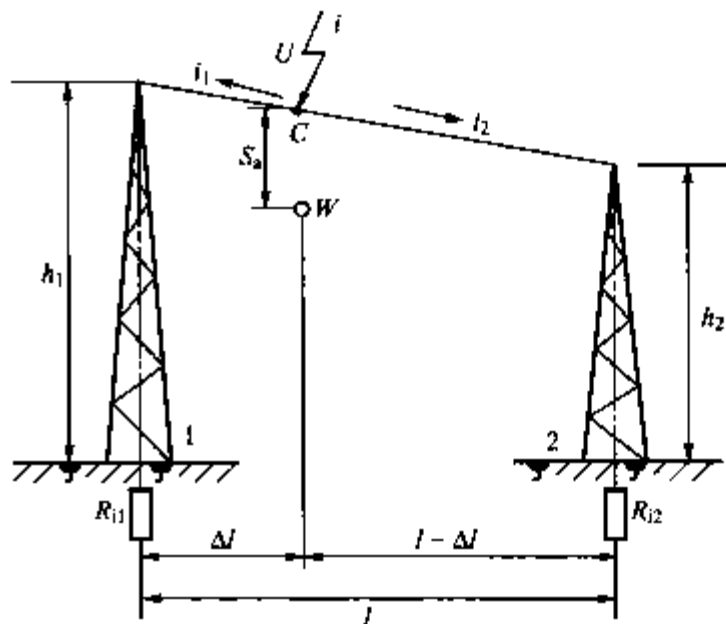


图 8-3 雷击两端接地的避雷线时的计算图

和避雷针保护一样,为了不发生反击事故,避雷线与被保护设备之间的空气距离  $S_a$  及避雷线的接地装置与被保护设备接地装置之间的地中距离  $S_e$  应足够大,且避雷线绝缘端的绝缘子串应有足够的绝缘强度,以防止反击事故的发生。

当避雷线一端绝缘时,雷击绝缘子串附近的避雷线开路端 c 点的过电压最高。该点的过电压  $u_c$  可按下式计算

$$u_c = iR_i + L_0(h + \Delta l) \frac{di}{dt} \quad (8-7)$$

式中  $L_0$ ——避雷线与接地架构单位长度的平均电感,  $\mu\text{H}/\text{m}$ ;

$\Delta l$ ——避雷线上校验的雷击点与接地支柱的距离, m;

$h$ ——避雷线支柱的高度, m。

避雷线两端接地时,雷击校验点 c 的过电压为

$$\begin{aligned} u_c &= i_1 R_{i1} + L_0(h_1 + \Delta l) \frac{di_1}{dt} \\ &= \beta' \left[ iR_{i1} + L_0(h_1 + \Delta l) \frac{di}{dt} \right] \end{aligned} \quad (8-8)$$

式中,  $i$  为总的雷电流;  $i_1$  为流向架构 1 的雷电流;  $\Delta l$  为避雷线上校验的雷击点与最近支柱间的距离;  $h_1$  和  $R_{i1}$  分别为架构 1 的高度和冲击接地电阻;  $\beta'$  为避雷线的分流系数,  $\beta' = i_1/i$ , 可由电路的基尔霍夫定律推导求得。当忽略接地电阻对  $\beta'$  的影响, 并设两侧架构高度相等 (为  $h$ ) 时, 有

$$\beta' \approx \frac{l - \Delta l + h}{l + 2h} \quad (8-9)$$

《标准》对避雷线与被保护设备之间的空气间隙距离  $S_a$ 、避雷线接地装置与被保护设备接地装置之间的地中距离  $S_e$  提出以下要求:

对一端绝缘、另一端接地的避雷线

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1(h + \Delta l) \quad (\text{m}) \quad (8-10)$$

$$S_e \geq 0.3R_i \quad (\text{m}) \quad (8-11)$$

对两端接地的避雷线

$$S_a \geq \beta' [0.2R_i + 0.1(h + \Delta l)] \quad (\text{m}) \quad (8-12)$$

$$S_e \geq 0.3\beta'R_i \quad (\text{m}) \quad (8-13)$$

一般情况下, 避雷针、避雷线的  $S_a$  不宜小于 5m,  $S_e$  不宜小于 3m。

避雷线一端绝缘时绝缘子串的片数, 按雷击绝缘子串附近避雷线不致使绝缘子串闪络的条件选择。

关于线路终端杆塔上的避雷线能否与变电站架构相连, 也按是否发生反击的原则处理。110kV 及以上配电装置, 可将线路的避雷线引接到出线门型架构上, 当土壤电阻率大于  $1000\Omega \cdot \text{m}$  时, 应装设集中接地装置。35、60kV 配电装置, 在土壤电阻率不大于  $500\Omega \cdot \text{m}$  的地区, 允许将线路的避雷线引接到出线门型架构上, 但应装设集中接地装置。在土壤电阻率大于  $500\Omega \cdot \text{m}$  的地区, 避雷线应终止于线路终端杆塔, 从线路终端杆塔到配电装置的一档线路由避雷针保护。

## 第二节 侵入波过电压的防护

当发电厂、变电站采取了可靠的直击雷保护措施后, 遭雷直击的概率很小。所以沿线侵入的雷电波是发电厂、变电站遭受雷害事故的主要原因。其主要防护措施是在发电厂、变电站内装设阀型避雷器或氧化锌避雷器以限制入侵雷电波的幅值, 使设备上的过电压不超过其冲击耐压值。在发电厂、变电站的进线段上设置进线保护, 以限制流经避雷器的雷电流和限制入侵雷电波的陡度。本节主要分析避雷器的保护作用。

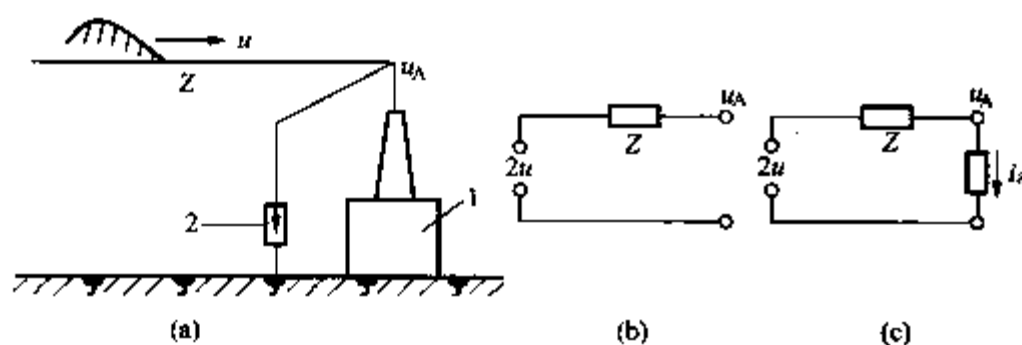


图 8-4 避雷器直接装在变压器旁边

(a) 接线图; (b) 动作前的等值电路; (c) 动作后的等值电路

1—变压器; 2—避雷器

这里先分析避雷器直接连接在变压器旁, 即认为变压器与避雷器之间的距离为零时, 避雷器的保护作用。接线如图 8-4 所示。

为简化分析, 不计变压器的对地入口电容, 雷电入侵波  $u$  沿线路入侵, 避雷器动作前后的电压可用图 8-4 (b)、(c) 所示的

等值电路分析。假定避雷器的伏安特性  $u_A = f(i_A)$  和伏秒特性  $u_A(t)$  为已知, 则可按图 8-5 所示的作图法求取变压器上的电压。

入侵波  $u$  到达变压器处, 在避雷器动作前, 相当于末端开路, 入侵波发生反射使电压上升为  $2u$ , 即变压器和避雷器上的电压均为  $2u$ 。当  $2u$  上升到与避雷器伏秒特性曲线  $u_A(t)$  相交时, 避雷器动作, 动作后按图 8-4 (c) 中的等值电路可列方程

$$2u = u_A + i_a Z \quad (8-14)$$

式中,  $i_a$  为流过避雷器的雷电流。

在图 8-5 中, 纵坐标取电压  $u$ , 横坐标分别取时间  $t$  和电流  $i$ 。在  $u-t$  坐标平面内, 当侵入波  $2u$  与伏秒特性  $u_s = f(t)$  相交于  $U_{ch}$  时, 避雷器开始放电。在  $u-i$  坐标平面内, 画出曲线  $u_A + i_a Z$ 。由式 (8-14) 可知,  $2u = u_A + i_a Z$ , 因此可根据已知的  $u$  波, 按照图 8-5 中虚线表示的步骤, 逐点求出避雷器上的电压  $u_A$ , 这也是变压器上的电压。

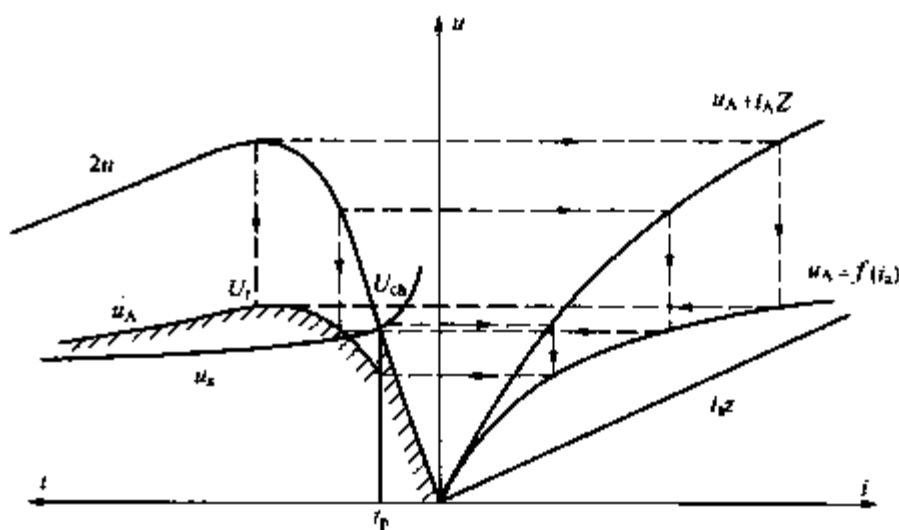


图 8-5 避雷器电压  $u_A$  的图解法

自侵入波的幅值处作水平线与曲线  $u_A + i_a Z$  相交, 交点对应的横坐标就是流过避雷器的最大雷电流  $I_{am}$ , 由  $I_{am}$  自伏安特性  $u_A = f(i_a)$  上所决定的电压即为避雷器上的最大残压  $U_r$ 。从图可知, 避雷器上的电压  $u_A$  具有两个峰值: 一个是冲击放电电压  $U_{ch}$ , 由于避雷器的伏秒特性  $u_s(t)$  很平, 故此值基本上不随入侵波陡度而变; 另一个是避雷器残压的最大值  $U_r$ , 在避雷器伏安特性已定的情况下, 残压与流过的雷电流的大小有关, 但因阀片的非线性特性, 当流过的雷电流在很大范围内变动时, 残压变化很小。实际上避雷器产品的全波冲击放电电压与额定放电电流下的残压很接近。因此为简化分析, 常将避雷器上的电压波形  $u_A$  近似地视为一个具有斜角波头的平顶波, 波头长度为避雷器的放电时间  $t_p$ , 与入侵波陡度有关, 幅值等于避雷器的残压。

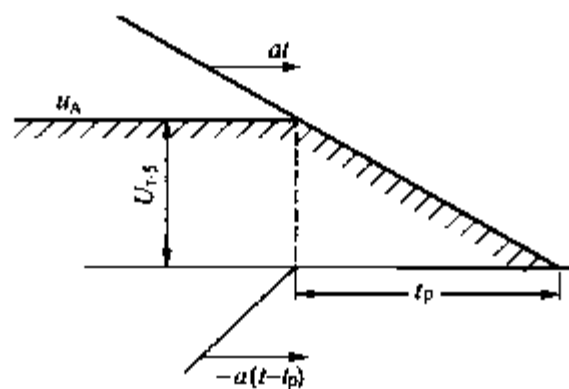


图 8-6 分析用避雷器上电压波形  $u_A$

在具有正常防雷接线的 110~220kV 变电站中, 流经避雷器的雷电流一般不超过 5kA (对 330kV 为 10kA), 故残压的最大值取雷电流为 5kA 下的数值。若入侵雷电波为斜角波, 即  $u = at$ , 则避雷器的作用相当于在避雷器放电时刻  $t_p$  起, 在避雷器的安装处产生了一个负电压波  $-a(t-t_p)$ , 如图 8-6 所示。

由于避雷器直接接在变压器旁, 所以变压器上的过电压波形与避雷器上的电压相同, 若变压器的冲击耐压值大于避雷器的冲击放电电压和残压, 变压器将得到可靠的保护。

但是变电站内有很多电气设备, 不可能在每个设备旁都装设一组避雷器, 一般是在变电站母线上装设避雷器。在任何可能的运行方式下, 变压器均应受到避雷器的保护, 所以各段母线上都应装设避雷器。当避雷器安装在母线上时, 避雷器离开变压器和各电气设备都有一段长度不等的距离, 当雷电波入侵时, 变压器和各电气设备的绝缘上出现的过电压将比避雷器上的电压要高出一个  $\Delta u$  值。下面以变压器为例来说明。

图 8-7 所示为用避雷器保护变压器的原理接线图。假设避雷器与变压器之间的电气距离为  $l$ , 有一陡度为  $a$  (kV/ $\mu$ s) 的斜角波  $u = at$  沿线路向避雷器袭来。设  $t = 0$  时, 侵入波到达 A 点 (即避雷器安装处), 该点电压  $u_A$  将按图 8-8 中的虚线 1 (陡度为  $a$ ) 上升, 经过时间  $\tau = l/v$  ( $v$  为雷电波在导线上的传播速度), 侵入波到达 B 点 (即变压器安装处)。

从最严重的条件出发,可假设变压器入口电容  $C_T$  极小,若  $C_T=0$  时,则当侵入波到达变压器时将发生全反射,图中虚线 2 为 B 处的入射波,反射波与它相同。变压器上的电压应为入射波和反射波的叠加,用虚线 3 表示,其陡度为  $2a$ ,即  $u_B=2a(t-\tau)$ 。再经过时间  $\tau$ ,反射波由变压器返回到避雷器处,如图中曲线 4 所示。从此时起,避雷器上的电压为入射波与反射波的和,即曲线 1 与曲线 4 的叠加,如图中 mn 段,其陡度也为  $2a$ 。当  $t \geq 2\tau$  时,  $u_A=at+a(t-2\tau)=2a(t-\tau)$ 。则在  $2\tau$  至避雷器动作前这段时间内,  $u_A=u_B$ 。假定  $u_A$  在  $t=t_0$  时上升到避雷器的放电电压,避雷器动作,限制了 A 点电压继续上升,由于避雷器的非线性特性,  $u_A$  的曲线基本上为水平直线,其值为  $2a(t_0-l/v)$ ,它应当等于避雷器的残压。即  $t=t_0$  时,有

$$u_A(t)=2a(t_0-l/v)=U_{r.5}$$

(8-15)

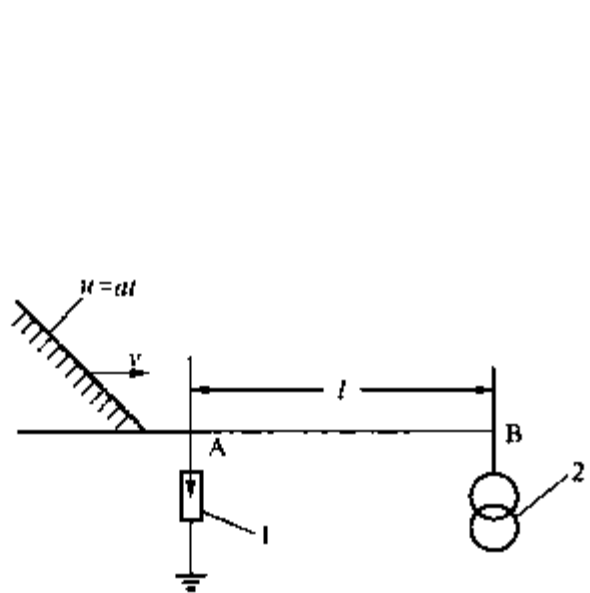


图 8-7 避雷器保护变压器的原理接线图  
1—避雷器; 2—变压器

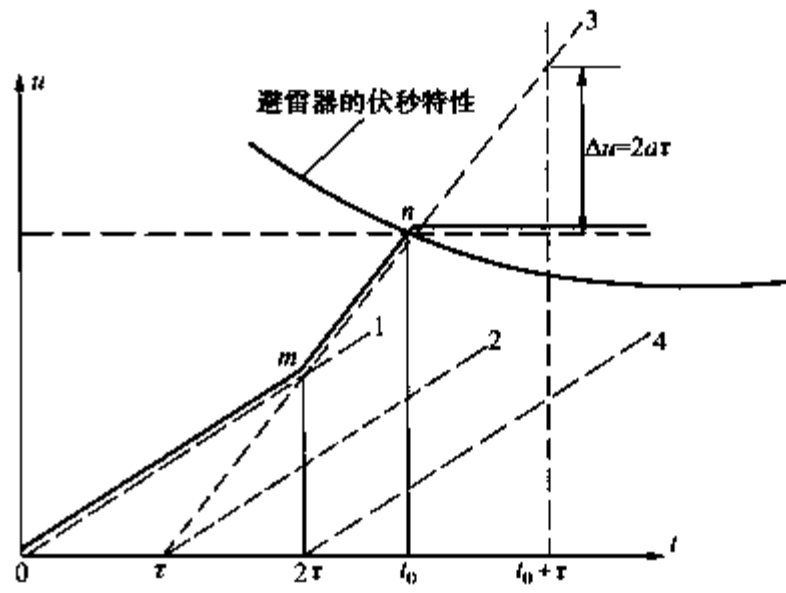


图 8-8 阀型避雷器保护设备时避雷器及设备上电压的波形

避雷器放电后限制电压的效果需经过时间  $\tau$ ,即在  $t=t_0+\tau$  后才能到达变压器。在这段时间 ( $\tau$ ) 内,变压器上的电压仍以  $2a$  的陡度继续上升。故变压器上的最大电压  $U_{Bm}$  为

$$U_{Bm}=2at_0=U_{r.5}+2a\tau$$

(8-16)

式 (8-15) 与式 (8-16) 表明,只要设备离开避雷器一段距离,则设备上所受到的冲击电压最大值必然比避雷器残压高出一个  $\Delta u$ ,数值为

$$\Delta u=2a\tau=2a\frac{l}{v}$$

(8-17)

由此可知,被保护设备与避雷器间的电气距离  $l$  越大、侵入波陡度  $a$  越大,电压差值  $\Delta u$  也就越大。当  $\Delta u$  值过大时,加在被保护设备上的电压可能会超过设备的冲击耐压值,设备的绝缘会损坏。所以为了保证加在变压器上的电压不超过其冲击耐压值,避雷器与变压器之间的电气距离不能太远,即避雷器有一定的保护范围。变电站内所有电气设备都应受到避雷器的保护,即它们与避雷器的距离都应在允许值内。此外,为了降低变压器上的雷电过电压,还必须限制流经避雷器的雷电流幅值和入侵波的陡度,以降低  $U_r$  和  $\Delta u$ 。

实际上,变压器有一定的入口电容,避雷器与变压器之间的连线也有电感、电容,它们将构成某种振荡回路,此外变电站具体的接线也较复杂。考虑到这些因素后,使得避雷器动作后在避雷器与变压器之间的波过程复杂化。由等值电路分析可知,变压器上的电压具有振荡性质,图 8-9 所示为变压器所受电压的实际典型波形。其振荡轴为避雷器的残压  $U_{r.5}$ ,

这是由于避雷器动作后，产生的负电压波在避雷器与变压器之间多次反射所引起的。这种波形与全波相差较大，对变压器绝缘的作用与截波的作用较为接近，因此常用变压器绝缘耐受截波的能力来说明在运行中该变压器承受雷电波的能力。变压器承受截波的能力称为多次截波耐压值  $U_j$ 。由实践经验知， $U_j$  约为变压器三次截波冲击试验电压  $U_{j3}$  的  $\frac{1}{1.15}$  倍，即  $U_j = \frac{U_{j3}}{1.15}$ 。同样，其他电气设备承受雷电波的能力也可用多次截波耐压值  $U_j$  表示。

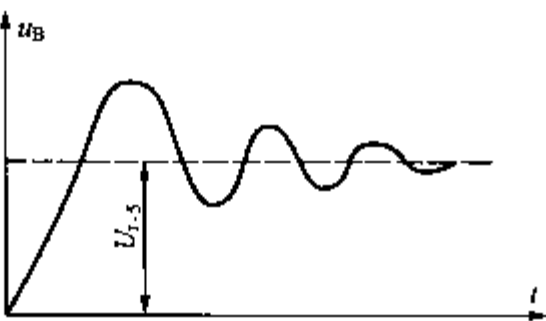


图 8-9 雷电波侵入时变压器上电压波的典型波形

当雷电波侵入变电站时，若设备上受到的最大冲击电压值  $U_{im}$  小于设备本身的多次截波耐压值  $U_j$ ，则设备不会发生雷害事故。因此为了保证设备安全运行，必须满足下式

$$U_{im} < U_j$$
$$U_{r.5} + 2a \frac{l}{v} < U_j$$

即

(8-18)

式中  $U_{im}$ ——设备上所受冲击电压的最大值，kV；

$U_j$ ——设备多次截波耐压值，kV；

$U_{r.5}$ ——避雷器 5kA 下的残压，kV。

上式表明变压器的冲击耐压值  $U_j$  是由避雷器的残压  $U_{r.5}$  所决定的，降低避雷器的残压可以降低变压器的绝缘水平。

对于一定的进波陡度  $a$ ，即可求得被保护设备与避雷器之间的最大允许距离为

$$l_{max} = \frac{U_j - U_{r.5}}{2a/v} \quad (m)$$

(8-19)

若以空间陡度  $a'$  (kV/m) 计算，上式可改写成

$$l_{max} = \frac{U_j - U_{r.5}}{2a'} \quad (m)$$

(8-20)

或者，对于已安装好的距离  $l$ ，可求出最大允许进波陡度为

$$a'_{max} = \frac{U_j - U_{r.5}}{2l} \quad (kV/m)$$

(8-21)

式 (8-19) 表明， $l_{max}$  与  $U_j - U_{r.5}$  有关，其值愈大， $l_{max}$  愈大。各电压等级变压器多次截波耐压值  $U_j$  和避雷器的残压见表 8-1，从表可知， $U_j$  比 FZ 型避雷器的残压  $U_{r.5}$  高出 40% 左右，比 FCZ 型高出 70% 左右。

表 8-1 变压器多次截波耐压值  $U_j$  与避雷器残压  $U_{r.5}$  的比较

额定电压 (kV)	变压器三次 截波耐压 $U_{j3}$ (kV)	变压器多次 截波耐压 $U_j$ (kV)	FZ 避雷器 5kA 残压 $U_{r.5}$ (kV)	FCZ 避雷器 5kA 残压 $U_{r.5}$ (kV)	变压器多次截波耐压 与避雷器残压的比	
					FZ	FCZ
35	225	196	134	108	1.46	1.81
110	550	478	332	260	1.44	1.83
220	1 090	949	664	515	1.43	1.85
330	1 300	1 130		820		1.38

以上是从最简单的情况来考虑,事实上设备的电容、变电站引出线的阻抗、冲击电晕等均可使情况变得有利。当变电站的出线较多时,由于其他线路的分流作用,最大容许距离会增大,可用下式计算

$$l_{\max}=k\frac{U_1-U_{r.5}}{2a'}\quad(\text{m})$$

(8-22)

式中,  $k$  为变电站出线修正系数。当母线上出线总数为 1、2、3、4 时,  $k$  值分别为 1.0、1.25、1.5、1.7。

入侵波陡度  $a$  为某一值时,变压器与避雷器之间的距离有一极限值,超过此值,变压器上受到的冲击电压将超过其冲击耐压值,变压器的绝缘会损坏,此值称为避雷器的保护范围。在变电站设计时,应使所有设备与避雷器的电气距离都在避雷器的保护范围之内。

根据上述方法计算出来的结果,我国标准所推荐的避雷器到变压器的最大电气距离  $l_{\max}$  见表 8-2 和表 8-3。

表 8-2 普通阀式避雷器至主变压器间的最大电气距离 (m)

系统标称电压 (kV)	进线段长度 (km)	进 线 路 数			
		1	2	3	≥4
35	1	25	40	50	55
	1.5	40	55	65	75
	2	50	75	90	105
66	1	45	65	80	90
	1.5	60	85	105	115
	2	80	105	130	145
110	1	45	70	80	90
	1.5	70	95	115	130
	2	100	135	160	180
220	2	105	165	195	220

注 1. 全线有避雷线进线段长度取 2km; 进线段长度在 1~2km 之间时的距离按补插法确定, 表 8-3 同此。  
2. 35kV 也适用于有串联间隙金属氧化物避雷器的情况。

表 8-3 金属氧化物避雷器至主变压器间的最大电气距离

系统标称电压 (kV)	进线段长度 (km)	进 线 路 数			
		1	2	3	≥4
110	1	55	85	105	115
	1.5	90	120	145	165
	2	125	170	205	230
220	2	125	195	235	265
		(90)	(140)	(170)	(190)

注 1. 本表也适用于电站碳化硅磁吹避雷器 (FM) 的情况。  
2. 本表括号内距离对应的雷电冲击全波耐受电压为 850kV。

式(8-22)中 $l_{\max}$ 是避雷器的保护距离,一般的做法可先求出变压器距避雷器的最大容许距离,而其他变电设备不像变压器那么重要,但它们的冲击耐压水平却比变压器更高,因而可近似地取其最大容许距离 $l'_{\max}$ 比变压器大35%,即

$$l'_{\max} \approx 1.35l_{\max} \quad (8-23)$$

在超高压大型变电站中,若一组避雷器不能可靠保护所有变电设备时,应再加一组避雷器,以满足防雷保护要求。

### 第三节 变电站的进线段保护

从上面分析可知,要将变电站电气设备上的过电压水平限制在其冲击耐压值以下,必须限制从线路传来的侵入波陡度,以限制 $\Delta u$ ;限制流过避雷器的雷电流不超过5kA以降低残压。如果在靠近变电站的线路上发生绕击或反击,进入变电站的雷电过电压的陡度和流过避雷器的冲击电流幅值都很大,不能使避雷器可靠地保护电气设备。这就要求在靠近变电站1~2km的一段进线上加强防雷保护措施,即进线段保护。当线路全线无避雷线时,这段线路必须架设避雷线;当线路全线有避雷线时,这段线路应具有更高的耐雷水平,如避雷线的保护角不宜超过 $20^\circ$ ,杆塔的冲击接地电阻不大于 $10\Omega$ ,进线段范围内杆塔的耐雷水平应达到有关规程规定的值(见表7-4),这样进线段内发生绕击和反击的概率会大大降低。进线段保护的作用有两个:一是将雷击点限制在进线段以外的线路,这样雷电流在流过进线段时由于冲击电晕而发生衰减和变形,降低了波前陡度和幅值;二是利用进线段导线本身的阻抗限制流经避雷器的雷电流幅值。

#### 一、35kV及以上变电站的进线段保护

35kV及以上变电站的进线段保护接线如图8-10所示。图8-10(a)是35~110kV线路全线无避雷线时进线段保护的标准接线方式,其中FE是排气式避雷器,F是变电站母线上安装的阀型避雷器或氧化锌避雷器。图8-10(b)是全线有避雷线时的进线段保护接线。变电站内电气设备与避雷器之间的最大允许电气距离是根据进线段以外落雷的情况求得的,下面分析进线段首端落雷时流经避雷器的雷电流及入侵波的陡度。

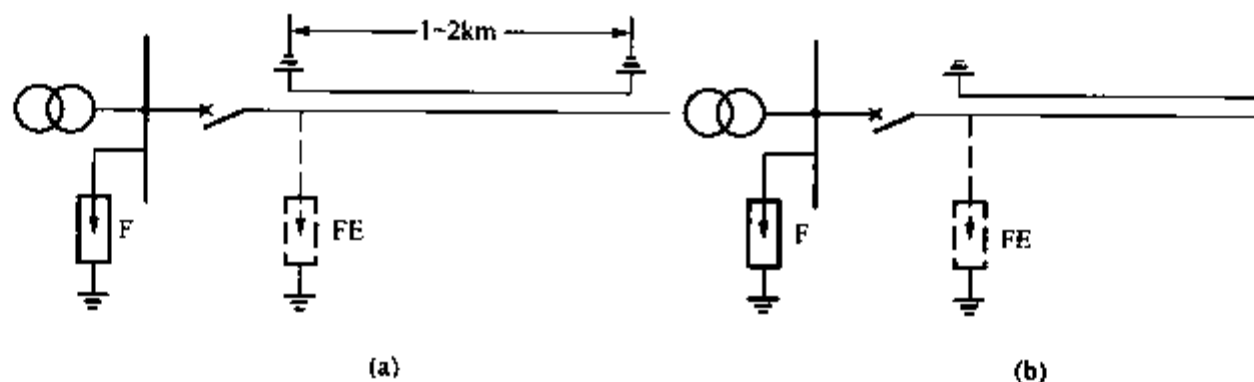


图 8-10 变电站的进线段保护接线

(a) 未沿全线架设避雷线的 35~110kV 线路的变电站的进线保护接线;

(b) 全线有避雷线的变电站的进线保护接线

#### 1. 进线段首端落雷时流经避雷器雷电流的计算

考虑最不利的情况,设变电站只有一回线路运行,进线段首端落雷,且来波的幅值为线路绝缘的50%冲击放电电压 $U_{50\%}$ 。由于行波在1~2km的进线段内往返一次的时间为 $2l/v = (2\,000 \sim 4\,000) / 300 = 6.7 \sim 13.3\mu s$ ,它已超过侵入波的波头时间,即避雷器动作

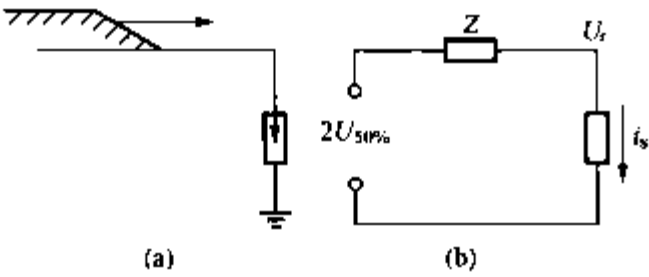


图 8-11 流经变电站避雷器雷电流  
计算用等值电路  
(a) 接线图；(b) 等值电路

$2U_{50\%}$ ——侵入电压波，kV。

由上式可得

后产生的负电压波折回到雷击点，经过该点的再反射到达避雷器前流经避雷器的电流已过峰值，可不考虑此反射波的影响。因此可用图 8-11 的等值电路计算流经避雷器雷电流的最大值  $I_s$ 。由图 8-11 (b) 可列出方程

$$2U_{50\%} = I_s Z + U_r \tag{8-24}$$

式中  $Z$ ——进线段导线的波阻抗， $\Omega$ ；

$U_r$ ——避雷器的残压最大值，kV；

$$I_s = \frac{2U_{50\%} - U_r}{Z}$$

对于 35~220kV 的线路，导线的波阻抗可取  $Z = 400\Omega$ ，对于 330kV 线路取  $Z = 300\Omega$ ；线路电压为 220kV 及以下时，避雷器残压用 5kA 下的残压，330kV 时用 10kA 下的残压。

例如，某 110kV 变电站中安装的是 FZ—110J 型阀式避雷器，110kV 母线有可能为单回进线方式运行，110kV 线路的  $U_{50\%} = 700\text{kV}$ 。由表 8-1 可查得 FZ—110J 在 5kA 下的残压  $U_r = 332\text{kV}$ ，导线波阻抗  $Z \approx 400\Omega$ ，则由上式可求得最大雷电流幅值为

$$I_s = \frac{2 \times 700 - 332}{400} = 2.67 \text{ (kA)}$$

用同样方法可计算出不同电压等级线路流过避雷器的最大冲击电流值，列于表 8-4。

表 8-4 进线段外落雷流经单路进线变电站避雷器雷电流幅值的计算结果

额定电压 (kV)	避雷器型号	线路绝缘的 $U_{50\%}$ (kV)	$I_s$ (kA)
35	FZ—35	350	1.41
110	FZ—110J	700	2.67
220	FZ—220J	1 200 ~ 1 400	4.35 ~ 5.38
330	FCZ—330J	1 645	7.06
500	FCZ—500J	2 060 ~ 2 310	8.63 ~ 10

2. 侵入变电站的雷电波陡度  $a$  的计算

最不利的情况是在进线段首端落雷，侵入雷电波最大幅值为线路绝缘的 50% 冲击放电电压  $U_{50\%}$ 。此电压已超过导线的临界电晕电压，因此导线在侵入雷电波的作用下将发生冲击电晕。由于电晕要消耗能量，从而导致侵入雷电波的幅值衰减，此外电晕加大了导线对地电容使波速降低引起波的变形。行波经过距离  $l$  后，因电晕效应变形后的波头长度可按下式计算

$$\tau = \tau_0 + \left(0.5 + \frac{0.008U}{h_c}\right)l_0 \quad (\mu\text{s}) \tag{8-25}$$

式中  $\tau_0$ ——进线段首端斜角波头长度， $\mu\text{s}$ ；

$\tau$ ——进线段末端变形后的斜角波头长度， $\mu\text{s}$ ；

$U$ ——侵入雷电波幅值, kV, 通常可取为进线段首端线路绝缘的 50% 冲击闪络电压  $U_{50\%}$ ;

$l_0$ ——进线段长度, km;

$h_c$ ——进线段导线的平均对地高度, m。

最严格的计算条件应该是在进线段首端出现具有直角波头的过电压波, 即雷在进线段首端反击, 其波头长度  $\tau_0$  接近于零, 此波经过距离  $l_0$  后, 其波头陡度为

$$a = \frac{U}{\tau} = \frac{U}{\left(0.5 + \frac{0.008U}{h_c}\right)l_0} \quad (\text{kV}/\mu\text{s}) \quad (8-26)$$

在比较短的距离内, 可令波速为  $300\text{m}/\mu\text{s}$ , 则侵入波的空间陡度  $a'$  为

$$a' = \frac{a}{v} = \frac{a}{300} = \frac{1}{\left(\frac{150}{U} + \frac{2.4}{h_c}\right)l_0} \quad (\text{kV}/\text{m})$$

如果令  $a$  为侵入波陡度的允许值, 则所需的进线段长度为

$$l_0 = \frac{U}{a\left(0.5 + \frac{0.008U}{h_c}\right)} \quad (\text{km}) \quad (8-27)$$

计算结果表明,  $l_0$  一般不大于  $1\sim 2\text{km}$ 。

相反, 当进线段长度  $l_0$  已选定时, 可用式 (8-24) 计算出不同电压等级变电站的进波陡度  $a$  (也可换算至空间陡度  $a'$ )。表 8-5 中列出了标准推荐的计算用入侵波陡度  $a'$  值。由该表按已知的进线段长度  $l_0$  查出  $a'$  值后, 即可按式 (8-20) 和式 (8-22) 求得变压器及其他电气设备到避雷器的最大允许电气距离。

对于未沿全线架设避雷线保护的线路, 若变电站进线的断路器或隔离开关在雷雨季节可能经常处于断路状态, 而线路侧又有电源时, 需在靠近隔离开关或断路器处装设一组排气式避雷器, 见图 8-10 (a) 中的 FE。因为在这种情况下, 当沿线路有雷电波入侵时, 波到达开断点将发生全反射使电压升高一倍, 有可能

表 8-5 变电站计算用入侵波陡度

额定电压 (kV)	计算用入侵波陡度 $a'$ (kV/m)	
	1km 进线段	2km 进线段或全线有避雷线
35	1.0	0.5
110	1.5	0.75
220	1	1.5
330	1	2.2
500	—	2.5

使开路状态的断路器或隔离开关发生对地闪络。由于线路侧带电, 将导致工频短路, 可能将断路器或隔离开关的绝缘支座烧毁。在重雷区, 雷雨季节中常闭合的断路器也宜装设 FE, 因为一次雷击引起断路器跳闸后, 可能发生连续雷击, 致使已跳闸的断路器闪络。FE 外间隙的距离的整定, 应使其在断路运行时, 能可靠地保护隔离开关或断路器, 而在闭路运行时不应动作, 即应处于母线避雷器的保护范围内, 以免因 FE 动作产生截波危及变压器的纵绝缘与相间绝缘。如 FE 整定有困难, 或无适当参数的排气式避雷器, 可用阀式避雷器代替。

全线架设避雷线的  $35\sim 220\text{kV}$  变电站, 其进线的隔离开关或断路器与上述情况相同时,

宜在靠近隔离开关或断路器处装设一组保护间隙或阀式避雷器。

二、35kV 及以上电缆进线段的保护

对发电厂、变电站的 35kV 及以上电缆进线段，在电缆与架空线的连接处，由于波的多次折、反射，可能形成很高的过电压，应装设阀式避雷器保护。避雷器的接地端应与电缆金属外皮连接。对三芯电缆，末端的金属外皮应直接接地，如图 8-12 (a) 所示；对单芯电缆，因为不许外皮流过工频感应电流而不能两端同时接地，且需限制末端形成很高的过电压，所以应经金属氧化物电缆护层保护器 (FC) 或保护间隙 (FG) 接地，如图 8-12 (b) 所示。

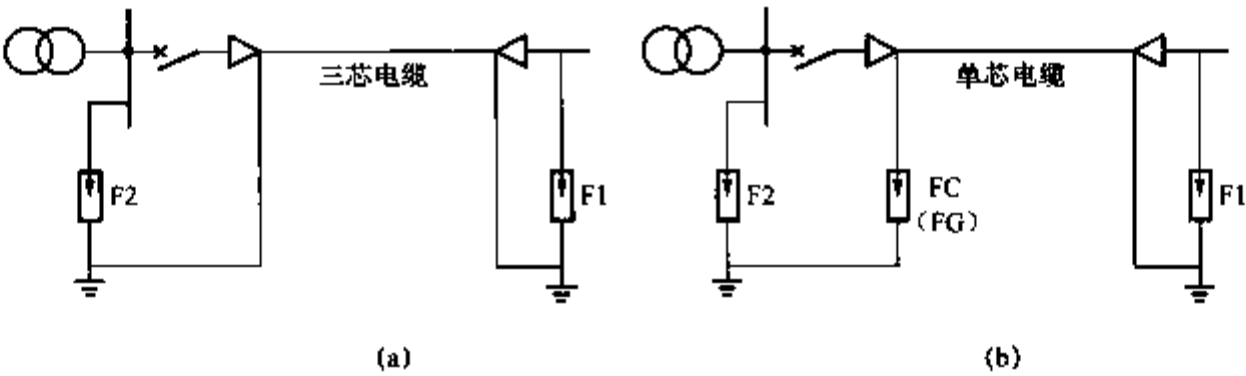


图 8-12 35kV 及以上电缆进线段的保护接线  
(a) 三芯电缆；(b) 单芯电缆

若电缆长度不超过 50m，或虽超过 50m，但经校验装一组阀式避雷器即能符合保护要求，图 8-12 所示进线电缆可只装 F1 或 F2。若电缆长度较长，且断路器在雷雨季节可能经常断路运行时，为防止开路端全反射形成很高的过电压使断路器损坏，应在电缆末端装设排气式避雷器或阀式避雷器。

连接电缆段的 1km 架空线路应架设避雷线。

对全线电缆—变压器组接线的变电站内是否需装设阀式避雷器，应根据电缆前端是否有雷电过电压波侵入的可能，经校验确定。

三、35kV 小容量变电站的简化进线段保护

对 35kV 的小容量变电站，可根据变电站的重要性和当地雷电活动强度等情况采用简化的进线段保护。由于 35kV 小容量变电站范围小，接线简单，避雷器距变压器的电气距离一般在 10m 以内，故允许有较高的侵入波陡度。对 3 150~5 000kVA 的变电站 35kV 侧，进线段的避雷线长度可以缩短到 500~600m。为限制流入变电站阀型避雷器的雷电流，在进线段首端可装设一组排气式避雷器或保护间隙。简化接线如图 8-13 所示。首端排气式避雷器或保护间隙的接地电阻不应超过 5Ω。

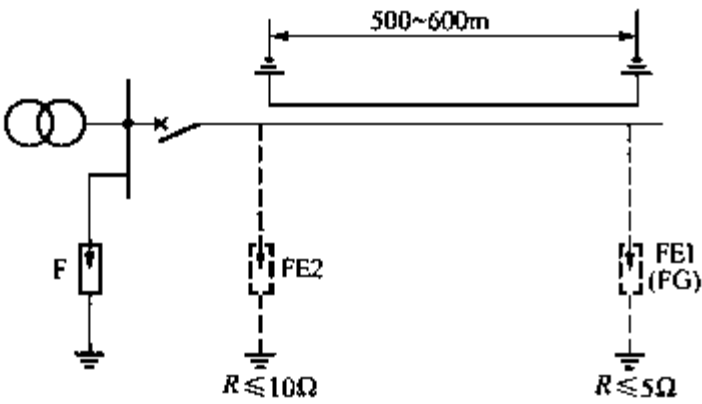


图 8-13 3 150 ~ 5 000kVA、35kV 变电站的简易保护接线

小于 3 150kVA 供非重要负荷的变电站 35kV 侧，根据雷电活动的强弱，可采用图 8-14 的保护接线。

变电站的 3~10kV 配电装置，应在每组母线和架空进线上装设阀式避雷器（分别采用电站型和配电型阀式避雷器）。有电缆段的架空线路，阀式避雷器应装设在电缆头附近，其接地端应和电缆金属外皮相连，接线如图 8-15 所示。

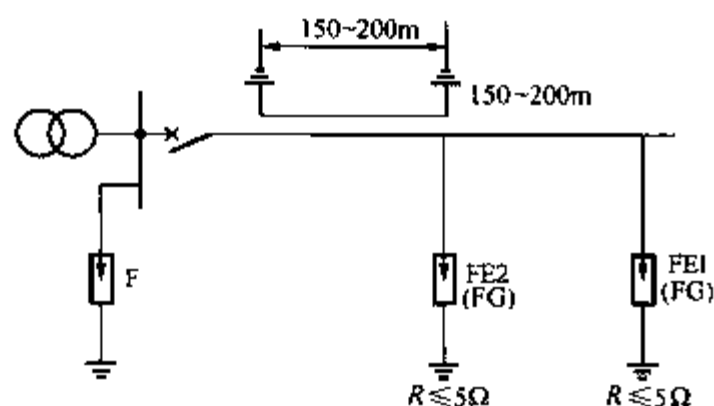


图 8-14 小于3150kVA 变电站的简易保护

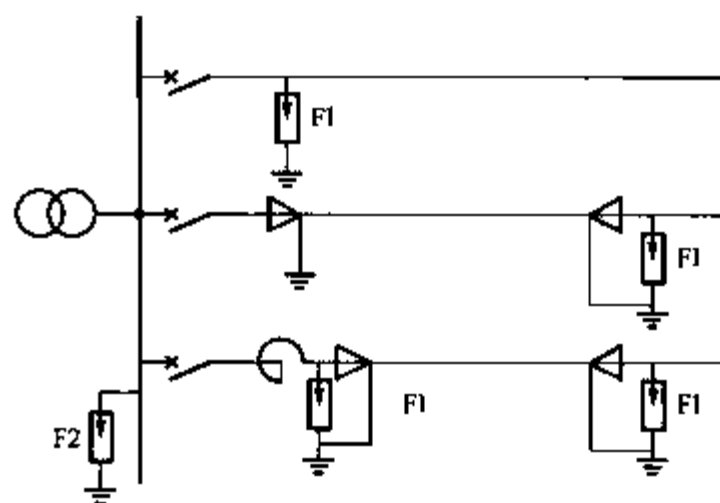


图 8-15 3~10kV 配电装置雷电侵入波的保护接线

## 第四节 变压器防雷保护的几个具体问题

### 一、三绕组变压器的防雷保护

如前所述，当变压器一侧有雷电波侵入时，通过绕组间的静电感应和电磁感应，在变压器的另一侧也会出现过电压。

双绕组变压器在正常运行时，高压侧和低压侧的断路器均是闭合的，两侧都有避雷器保护。所以，一侧来波时在另一侧感应出的过电压不会对绕组绝缘造成损害。

三绕组变压器在正常运行时，可能出现只有高、中压绕组运行而低压绕组开路的情况。此时，当高压或中压侧有雷电波侵入时，由于处于开路状态的低压绕组对地电容较小，可能使低压绕组上的静电感应过电压达到很高的数值，将危及到低压绕组的绝缘。考虑到静电感应分量使低压绕组三相的电位同时升高，故为了限制这种过电压，只要在任一相低压绕组出口处对地加装一个避雷器即可。中压绕组虽也有开路运行的可能，但其绝缘水平较高，一般可不装设限制静电感应过电压的避雷器。

### 二、自耦变压器的防雷保护

为了减小系统的零序阻抗和改善电压波形，自耦变压器除了高、中压自耦绕组外，还有一个接成三角形的低压非自耦绕组。同理，在这个低压绕组的任一相上应装设限制静电感应过电压的避雷器。

自耦变压器在运行中还可能出现高低压绕组运行，中压绕组开路和中低压绕组运行、高压绕组开路的运行方式。由于高、中压自耦绕组的中性点均直接接地，当有幅值为  $U_0$  的侵入波加在自耦绕组的高压端  $A_1$  时，自耦绕组中各点电位的初始分布、稳态分布和最大电位包络

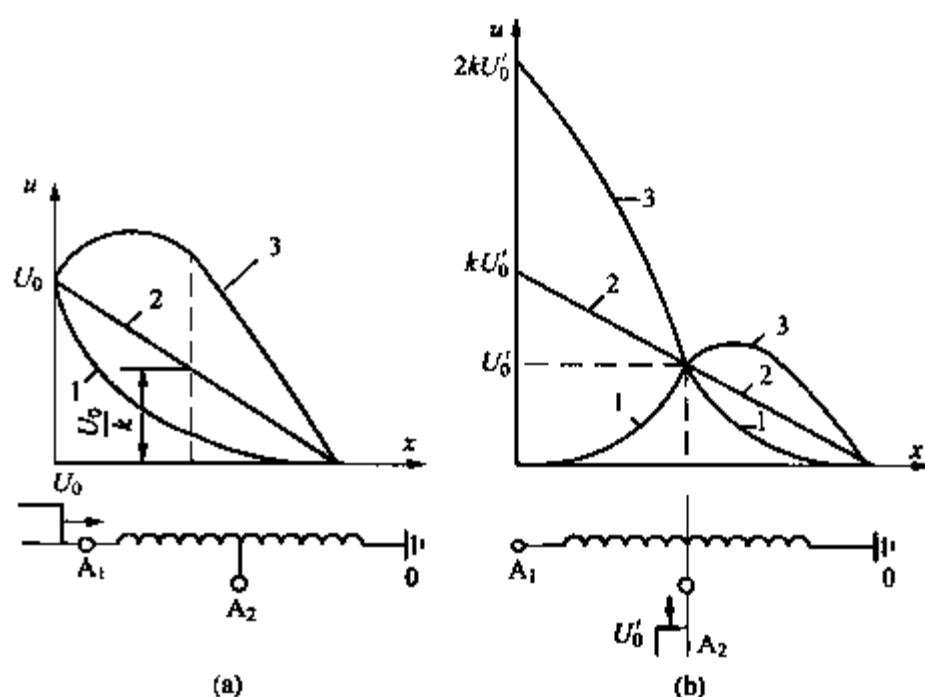


图 8-16 雷电波侵入自耦变压器时的过电压分布

(a) 高压端  $A_1$  进波；(b) 中压端  $A_2$  进波

1—初始电压分布；2—稳态电压分布；3—最大电位包络线

线都和中性点接地的单绕组相同,如图 8-16 (a) 所示。在开路的中压端子  $A_2$  上可能出现的最大电压约为高压侧电压  $U_0$  的  $2/k$  倍 ( $k$  为高、中压绕组的变比),因而有可能使处于开路状态的中压侧套管闪络,所以在中压侧出线套管与断路器之间应装设一组阀型避雷器进行保护。

当高压侧开路,中压侧端子  $A_2$  上有幅值为  $U'$  的过电压波入侵时,自耦绕组各点的电位分布如图 8-16 (b) 所示。由  $A_2$  到  $O$  这段绕组的稳态电位分布和末端接地的变压器绕组相同,由  $A_2$  到开路的高压端子  $A_1$  之间的稳态电位分布是由中压端  $A_2$  到中性点  $O$  的稳态分布的电磁感应所产生的,即高压端  $A_1$  的稳态电压为  $kU'$ ,在振荡过程中, $A_1$  点的电位最高可达  $2kU'$ ,因而将危及开路的高压端绝缘。为此在高压侧出线套管与断路器之间也应装设一组阀型避雷器保护。

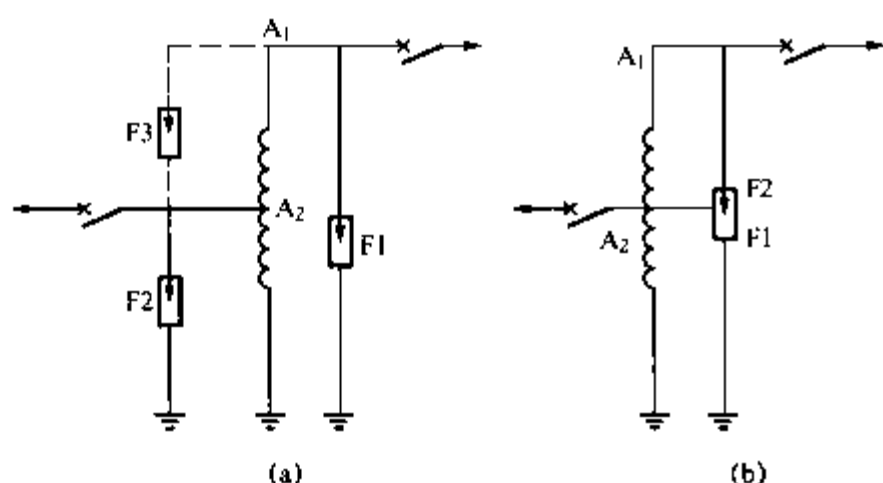


图 8-17 保护自耦变压器的避雷器配置  
(a) 一般避雷器配置; (b) “自耦”避雷器配置

此外,当中压侧接有出线时,相当于  $A_2$  点经线路波阻抗接地。若高压侧有雷电波入侵时,由于线路波阻抗比变压器绕组的波阻抗小得多,所以  $A_2$  点相当于接地,过电压大部分将加在  $A_1A_2$  段绕组上,可能使这段绕组的绝缘损坏。同理,高压侧接有出线而中压侧有雷电波入侵时也会造成类似的后果,并且  $A_1A_2$  段绕组越短,危险性越大。因此当变压器高、中压绕组之间的变比  $k$  小于 1.25 时,在  $A_1A_2$  之间还应加装一组避雷器。

自耦变压器的防雷保护接线如图 8-17 所示。

### 三、变压器中性点的保护

在 110kV 及以上的中性点直接接地系统中,为了减小单相接地短路电流,可能有一部分变压器的中性点改为不接地运行。这时变压器的中性点需要保护。

用于这种系统的变压器,其中性点对地绝缘有两种设计方案:

- (1) 全绝缘,即中性点处的绝缘水平与绕组首端的绝缘水平相等;
- (2) 分级绝缘,即中性点处的绝缘水平低于绕组首端的绝缘水平。

当变压器中性点绝缘为全绝缘时,其中性点一般不需要保护。若变电站为单台变压器且为单路进线运行时,在三相同进波的情况下,中性点的最大电位可达绕组首端电位的两倍。这种情况虽属少见,但在单台变压器的变电站中,若变压器中性点绝缘损坏,后果很严重,故需在中性点加装一个与首端同样电压等级的避雷器。

当变压器中性点采用分级绝缘时,应选用与中性点绝缘等级相同的避雷器加以保护,且宜选变压器中性点氧化锌避雷器。中性点若用阀型避雷器,则应满足以下条件:

- (1) 其冲击放电电压应低于变压器中性点的冲击耐压;
- (2) 其灭弧电压应大于因电网一相接地而引起中性点电位升高的稳态值,以免避雷器爆炸。

对于 35~60kV 中性点不接地、经消弧线圈接地和高电阻接地的系统,变压器中性点为全绝缘,由于三相来波的概率很小,且变电站的进出线较多,对雷电流有分流作用,变压器绝

缘也有一定的裕度，所以变压器的中性点一般不需装设防雷保护装置。但多雷区单进线变电站且变压器中性点引出时，宜装设保护装置。可选用氧化锌避雷器或碳化硅普通阀式避雷器。

### 第五节 配电变压器的防雷保护

配电网具有设备多和分布广的特点，它担负着向广大用户供电的任务。由于配电网电压等级较低，往往容易发生雷害事故。配电变压器是配电网中十分重要的设备，因此应采用避雷器加以保护。

配电变压器的保护接线如图 8-18 所示。其高压侧应装设氧化锌避雷器或阀型避雷器保护，避雷器应尽可能靠近变压器装设，并尽量减小连接线的长度，以减小雷电流在连接线电感上的电压降，使变压器绕组与避雷器之间不致产生很大的电位

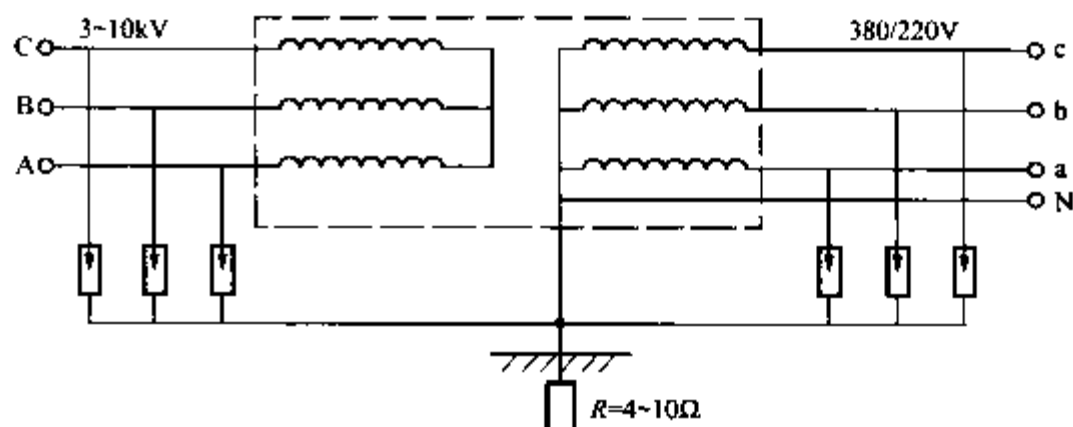


图 8-18 配电变压器的防雷保护接线

差。避雷器的接地线应与变压器的金属外壳以及低压侧中性点（中性点不接地时则为中性点的击穿保险器的接地端）连接在一起接地。这样，如果高压侧来波，作用在高压侧主绝缘上的电压就只是避雷器的残压，而不包括接地电阻  $R$  上的电压降。

如果只在高压侧装设避雷器，运行经验表明，还不能使变压器免除雷害事故。这主要是正、反变换过电压所造成的。

高压侧有雷电波入侵时，高压侧避雷器动作，雷电流将在接地电阻上产生电压降  $iR$ 。这一电压将作用到低压侧中性点上，而低压侧出线相当于经线路波阻抗接地，因而这个压降绝大部分都加在低压绕组上，通过电磁耦合按变比关系在高压绕组感应出高电压，这种过电压即为反变换过电压。由于高压绕组出线端的电位受避雷器固定，因此这个电压沿高压绕组分布，在中性点处达最大值，可能使中性点附近绝缘损坏。

对于郊区农村的配变，由于低压出线较长，多位于旷野，没有高建筑物及树木的屏蔽，故低压线路易遭雷击。若低压侧线路落雷，作用在低压侧的冲击电压按变比关系感应到高压侧，使高压绕组上出现过电压。这种过电压即为正变换过电压。由于低压侧绝缘裕度比高压侧大，故有可能使高压侧绝缘击穿。所以为了防止正、反变换过电压对配电变压器造成的损坏，还应在配电变压器的低压侧加装一组阀型避雷器进行保护。

### 第六节 气体绝缘变电站 (GIS) 的过电压保护

全封闭  $\text{SF}_6$  气体绝缘变电站 (GIS)，是将除变压器以外的高压电力设备及母线封闭在一个接地的金属壳内，壳内充以 3 ~ 4 个大气压的  $\text{SF}_6$  气体作为相间和相对地的绝缘。

GIS 变电站具有体积小，占地面积小，维护工作量小，不受周围环境条件影响，对环境

没有电磁干扰以及运行性能可靠等优点,已获得越来越多的采用。在我国 110kV、220kV 系统已经有了一些运行经验;在 500kV 输变电系统中,特别是在大型水电工程和城市高压电网的建设中,正在得到日益广泛的应用。

GIS 变电站在过电压保护和绝缘配合方面与敞开式常规变电站相比有其特点,本节主要介绍其在雷电过电压保护方面的特点及保护接线方式。

### 一、GIS 变电站过电压保护特点

(1) GIS 绝缘的伏秒特性比较平坦,且负极性击穿电压比正极性低,因此其绝缘水平主要取决于雷电冲击电压水平。要降低绝缘水平,首先要降低雷电过电压水平。

GIS 变电站和常规变电站绝缘在冲击伏秒特性和极性效应上的差异,是由于它们的绝缘结构和电场分布不同引起的。在敞开式的空气绝缘变电站中,空气绝缘间隙距离大,高压电气设备处于极不均匀电场中,冲击伏秒特性较陡,雷电冲击绝缘水平和操作冲击绝缘水平的比值较大,且由于棒电极电晕放电空间电荷的影响,使正极性击穿电压比负极性低。

在 GIS 变电站中, SF<sub>6</sub> 气体绝缘结构为均匀或稍不均匀电场,其冲击伏秒特性较平坦,雷电冲击绝缘水平与操作冲击绝缘水平十分接近。负极性时导体电极表面的高场强,使电子崩容易从这里开始发展形成击穿,故负极性击穿电压比正极性低。因此,一般认为 GIS 的绝缘水平主要取决于雷电冲击水平。所以采用保护性能优异的氧化锌避雷器限制 GIS 的雷电过电压具有十分重要的意义。

(2) GIS 变电站的波阻抗远比架空线路低,这对变电站的侵入波保护有利。GIS 变电站的波阻抗一般在 60~100Ω 之间,所以折射系数较小,从架空线路进入 GIS 的折射波的幅值和陡度,都比到达 GIS 入口的侵入波小得多。这在 GIS 较长或侵入波较陡的情况下,对 GIS 的保护特别有利。

(3) GIS 变电站结构紧凑,设备之间的电气距离小,避雷器离被保护设备较近,防雷保护措施比敞开式变电站容易实现。

(4) GIS 绝缘完全不允许发生电晕,一旦发生电晕将立即击穿,而且不能恢复原有的电气强度,甚至导致整个 GIS 系统的损坏。此外, GIS 的价格还比较昂贵。因此,要求整套 GIS 装置过电压保护应有较高的可靠性,在设备绝缘配合上留有足够的裕度。

### 二、GIS 变电站的过电压保护接线方式

根据以上分析和国内外大量的模拟试验或计算机计算表明, GIS 变电站的雷电冲击过电压水平比敞开式常规变电站低。实现过电压保护比较容易。

实际的 GIS 变电站可能有不同的主接线方式。其进线方式大体可分为两类:一是架空线直接与 GIS 相连;二是经电缆段与 GIS 相连。而变压器的连接,有直接相连的,也有经一段电缆线或架空线连接的。后者应尽可能避免,这样对变压器的保护较为有利。下面就对防雷保护来说比较不利的接线,即一条架空线路进入 GIS 变电站, GIS 末端连接变压器的情况,讨论 GIS 的典型保护接线方式。

#### 1. 与架空线路直接相连的 GIS 变电站的防雷保护接线

保护接线如图 8-19 所示。对于母线长度不长(66kV 不超过 50m, 110kV 及 220kV 不超过 130m)的 GIS 变电站,或长度虽超过,但经校验装一组避雷器即能符合保护要求时,可只在 GIS 入口处外侧装设一组 ZnO 避雷器,其接地端应与管道金属外壳连接,见图 8-19(a);对于母线较长的 GIS 变电站,上述保护方式不能满足要求时,可以考虑在变压器出口

处加装一组避雷器，如图 8-19 (b) 所示。这样还能进一步降低变压器和 GIS 的绝缘水平。变压器侧是否装设避雷器应通过技术经济比较决定。

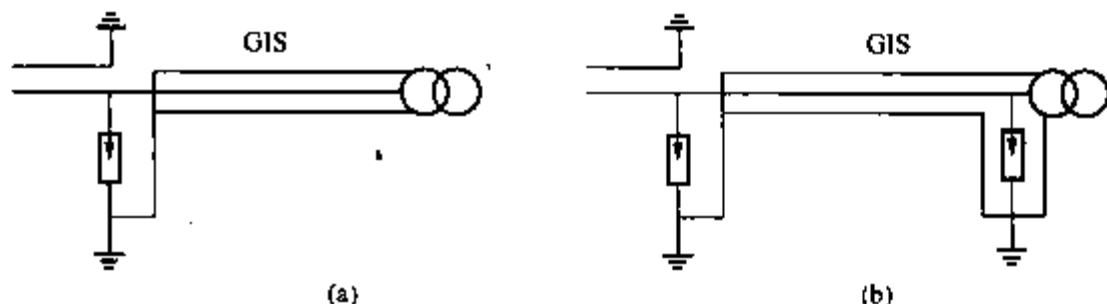


图 8-19 与架空线直接相连的 GIS 的保护接线

(a) GIS 入口处装避雷器；(b) GIS 末端加装避雷器

连接 GIS 管道的架空线路进线保护段的长度不

应小于 2km，且进线保护段范围内的杆塔耐雷水平符合规程要求。

## 2. 经电缆段进线的 GIS 变电站的防雷保护接线

雷电波从架空线路传播到变压器，首先要经过架空线到电缆的折射（折射系数小于 1），然后从电缆到 GIS 的折射（折射系数大于 1）。作用在变压器和 GIS 上的过电压波，要经过多次的折、反射，具体条件不同，折、反射的情况可能比较复杂。

对有电缆段进线的 GIS 变电站的过电压保护，可采用图 8-20 所示接线方式。在电缆段与架空线路的连接处装设氧化锌避雷器（FMO1），其接地端应与电缆的金属外皮连接。对三芯电缆，末端的金属外皮应与 GIS 管道金属外壳连接接地，如图 8-20 (a) 所示；对单芯电缆，应经金属氧化物电缆护层保护器（FC）接地，如图 8-20 (b) 所示。

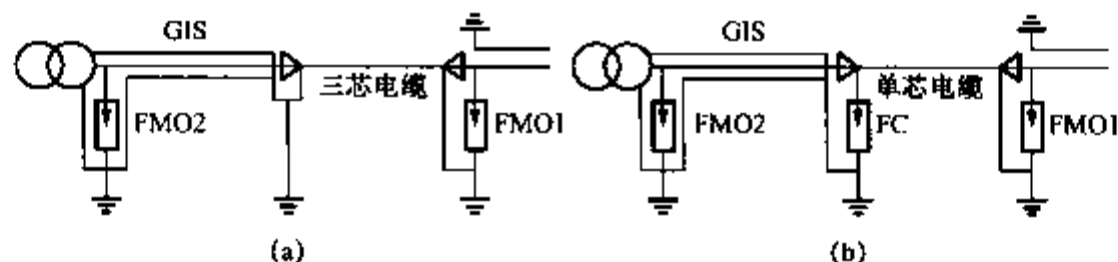


图 8-20 经电缆段进线的 GIS 的保护接线

(a) 三芯电缆进线；(b) 单芯电缆进线

电缆末端至变压器的距离较短，经校验，装一组避雷器即能符合保护要求时，图 8-20 中可不装设 FMO2。

## 第七节 旋转电机的防雷保护

旋转电机包括发电机、调相机、电动机等在正常运行时处于高速旋转状态的电气设备。其中以发电机最为重要，一旦遭受雷害事故，损失会很严重。本节主要讨论发电机的防雷保护。

### 一、旋转电机防雷保护的特点

(1) 由于旋转电机在结构和工艺上的特点，旋转电机的冲击绝缘水平在相同电压等级的电气设备中最低。表 8-6 列出了发电机主绝缘的出厂耐压值、相同电压等级的变压器出厂冲击耐压值及相应等级避雷器残压的比较，可见电机的冲击耐压值只有变压器的  $1/2.5 \sim 1/4$ 。这是因为电机绕组不像变压器那样为浸在油中的组合绝缘，而是全靠固体介质来绝缘，故其绝缘相对来说更容易受潮和污染。其次，在制造过程中也可能会使固体绝缘损伤或有气隙，造成绝缘隐患，在这些地方很容易发生局部游离而使绝缘逐渐损坏。同时，电机也不能采取

其它均压措施使电压分布均匀。特别是大容量的单匝电机，它的匝间电容很小，不能利用它改善冲击电压分布，因而电机主绝缘的冲击系数很低，接近于 1。此外电机绝缘，特别是导线出槽处，电场极不均匀，故在过电压作用后，会有局部的轻微损伤，使绝缘老化，可能引起击穿。

表 8-6 发电机耐压值与同级变压器耐压值及避雷器特性的比较

电机额定电压 (kV, 有效值)	电机出厂工 频耐压值 (kV, 有效值)	电机出厂冲 击耐压值 (kV, 幅值)	同级变压器出 冲击耐压值 (kV, 幅值)	FCD 型避雷器 3kA 下残压 (kV, 幅值)	ZnO 避雷器 3kA 下残压 (kV, 幅值)
10.5	$2U_N + 3$	34	80	31	26
13.8	$2U_N + 3$	43.3	108	40	34.2
15.75	$2U_N + 3$	48.8	108	45	39

(2) 电机在运行中受潮湿、机械振动、发热以及局部放电所产生的臭氧的侵蚀等影响，绝缘容易老化。

(3) 保护旋转电机用的磁吹避雷器（FCD 型）或 ZnO 避雷器的保护水平与电机的冲击耐压值很接近，绝缘配合的裕度很小。从表 8-6 可知，电机出厂冲击耐压值只比 FCD 型避雷器的残压高 8%~10%，ZnO 避雷器要好一点，但也仅高出 25%~30%。考虑到电机在运行中绝缘性能还要下降，裕度会更小。所以仅由避雷器来保护旋转电机是不够的，还必须与电容器、电抗器、电缆段等配合才能构成较可靠的保护。

(4) 由于电机绕组结构布置的特点，特别是大容量电机，其匝间电容很小，起不了改善冲击电压分布的作用。此外，当有冲击波作用于电机绕组时，绕组匝间绝缘上所受电压与侵入波陡度  $\alpha$  成正比。由实验知，为使电机绕组的匝间绝缘不致损坏，必须限制侵入波的陡度。

此外，为了降低电机中性点的过电压，也要求限制入侵波陡度。因为电机绕组的中性点是不接地的，当三相来波为直角波头时，电机中性点电压可达来波电压的两倍，因此必须对中性点采取保护措施。试验表明，入侵波陡度降低时，中性点过电压也随之减小。

综上所述，旋转电机的防雷保护应包括电机主绝缘、匝间绝缘和中性点绝缘的保护。试验与运行经验表明：为使一般电机的匝间绝缘不致损坏，需将入侵波陡度限制在  $5\text{kV}/\mu\text{s}$  以下。若电机中性点不引出，为保护中性点绝缘需将入侵波陡度限制在  $2\text{kV}/\mu\text{s}$  以下。

二、直配电机的防雷保护

直接与架空线路相连（包括经过电缆段、电抗器等元件与架空线相连）的电机称为直配电机。这种电机因过电压波直接从线路入侵，幅值及陡度都较大，对电机绝缘的威胁较大，故要求其有可靠的防雷保护措施。

作用在直配电机上的雷电过电压有两类：一是与电机相连的架空线路上的感应雷过电压；一是由雷直击于与电机相连的架空线路而引起的过电压。

直配电机的防雷保护应根据电机的容量、重要程度以及当地雷电活动的强弱，采取合适的保护措施。对直配电机的防雷可采取以下措施。

(1) 在发电机出线母线上装设一组 FCD 型磁吹避雷器或氧化锌避雷器，以限制侵入波幅值。

(2) 在发电机电压母线上装设一组并联电容器，以限制侵入波陡度，如图 8-21 所示。这不但是保护电机匝间绝缘及中性点绝缘的需要，同时也可降低感应过电压。电容器的保护作用可用图 8-21 (b) 所示的等值电路分析。计算结果表明，每相电容为  $0.25 \sim 0.5 \mu\text{F}$  时，可将入侵波陡度限制在  $5\text{kV}/\mu\text{s}$  以下。

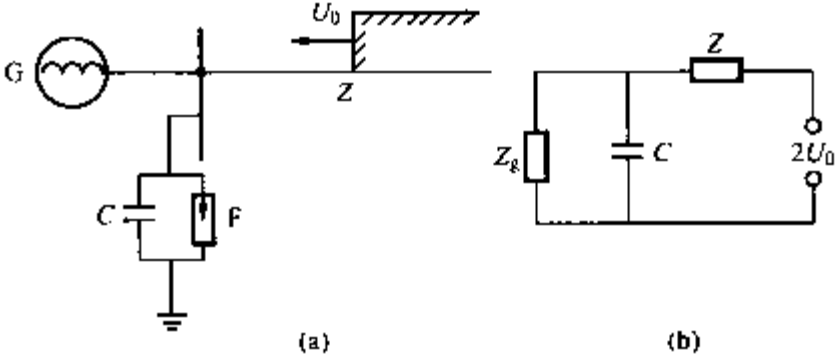


图 8-21 电机母线上装设电容  $C$  以限制来波陡度  
(a) 原理接线图；(b) 等值电路  
 $Z_g$ —发电机波阻抗

(3) 进线段保护。为了将流过母线避雷器的雷电流限制在  $3\text{kA}$  以下，需设置进线保护段。图 8-22 所示为电缆段与排气式避雷器联合构成的典型进线保护段。发电机经过一段长度大于  $100\text{m}$  的电缆与架空线相连接。电缆段的首端接有排气式避雷器  $\text{FE}_1$ ，电缆的外皮两端接地。雷电波入侵时，排气式避雷器  $\text{FE}_1$  动作，电缆芯线与外皮短接在一起，雷电流  $i$  通过  $\text{FE}_1$  的接地电阻  $R_1$  时所形成的电压降  $iR_1$  同时作用在电缆芯线和外皮上。 $\text{FE}_1$  动作后，其等值电路如图 8-22 (b) 所示。这时沿着外皮将有电流  $i_2$  流向电机侧， $i_2$  在电缆外皮的自感  $L_2$  上

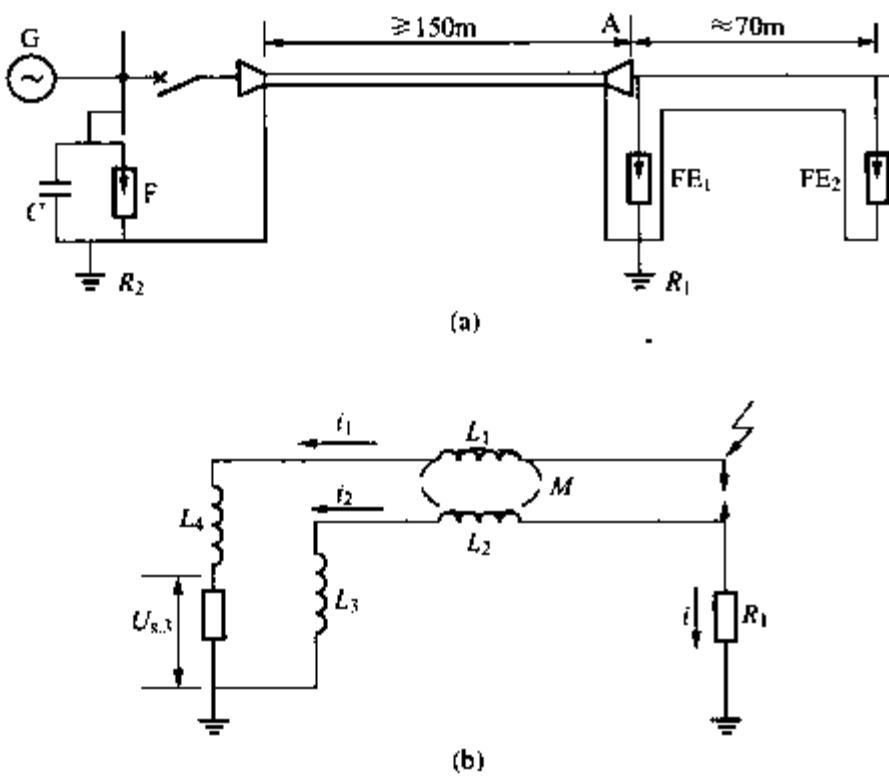


图 8-22 有电缆段的直配电机保护接线  
(a) 原理接线图；(b) 等值电路

产生压降  $L_2 \frac{di_2}{dt}$ ，它是由与电缆外皮相匝链的磁通造成的。由于电缆外皮与芯线为同轴圆柱体，这些磁通必然也全部与芯线相匝链，即其间的互感  $M$  等于外皮的自感  $L_2$ ，因此电缆芯线上也会产生大小为  $L_2 \frac{di_2}{dt}$  的反电动势，此反电动势将阻止雷电流  $i_1$  沿芯线流向电机侧，从而限制了流经母线避雷器的雷电流。如果  $L_2 \frac{di_2}{dt}$  与  $iR_1$  完全相等，在芯线中就不会有电流流过。但因电缆外皮末端的接地引下线总有电感  $L_3$  ( $R_2$  为电厂接地网的接地电阻，可不计)，故  $iR_1$  与  $L_2 \frac{di_2}{dt}$  之间就有差值  $L_3 \frac{di_2}{dt}$ 。差值越大，流过

芯线的电流就越大。故应尽量缩短电缆末端外皮接地引下线到接地网的距离。

由以上分析可知，此种进线保护段的限流作用必须以排气式避雷器  $\text{FE}_1$  动作为前提。但由于电缆的波阻抗远比架空线的波阻抗小，侵入波到达电缆首端 A 点将发生负反射，使 A 点电压降低， $\text{FE}_1$  不易动作，则电缆段的限流作用不能发挥，雷电流将全部通过芯线流入电机母线，可能使母线避雷器 F 中的雷电流超过  $3\text{kA}$ 。为了使  $\text{FE}_1$  容易动作，可将  $\text{FE}_1$  沿架空线前移  $70\text{m}$  左右，如图 8-22 (a) 中  $\text{FE}_2$  所示。雷电波入侵时，在 A 点的负反射波到达  $\text{FE}_2$  处之前，使  $\text{FE}_2$  动作。也可在电缆首端 A 点与  $\text{FE}_1$  间装设一个  $100 \sim 300 \mu\text{H}$  的电感，

利用电感对侵入波的正反射波使  $FE_1$  动作。 $FE_2$  的接地端应和电缆首端外皮的接地装置用导线连接, 连接线应悬挂在杆塔导线下面  $2\sim 3\text{m}$  处, 其目的是增加两线间的耦合。采用此接线后, 虽然  $FE_2$  易放电, 但放电后, 从其接地端到电缆首端外皮的连接线上的压降不能全部耦合到导线上, 故其限流的效果较差, 沿芯线流向母线的电流会增大, 强雷时可能超过  $3\text{kA}$ 。为防止这种情况, 应在电缆首端保留一组避雷器, 遇强雷时, 此避雷器也动作, 以充分发挥电缆段的限流作用。

图 8-23 所示为规程建议的大容量 ( $25\,000\sim 60\,000\text{kW}$ ) 直配电机的典型防雷保护接线。其中  $L$  是限制工频短路电流的电抗器, 此时应加装一组 FS 型避雷器以保护电抗器和电缆端部。FS 的动作还可以进一步限制流经母线避雷器的雷电流。

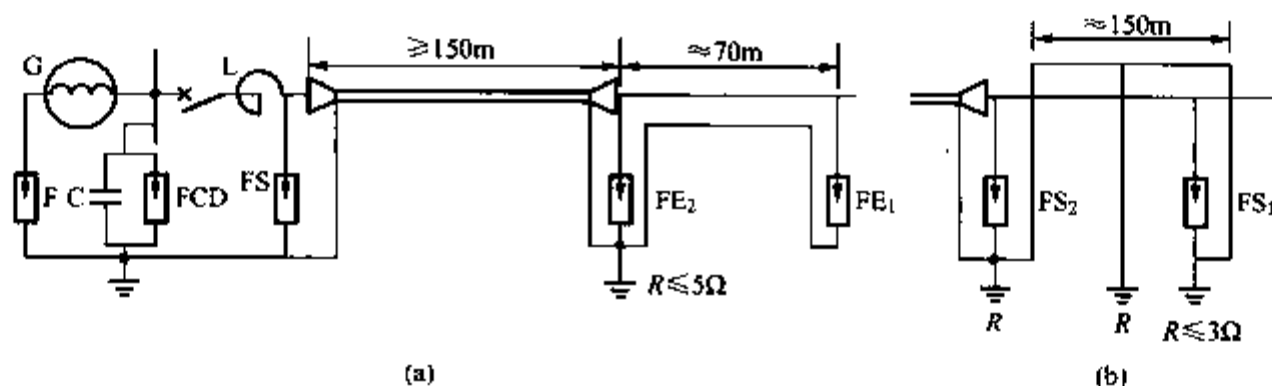


图 8-23 25 000 ~ 60 000kW 直配电机的保护接线图

(a) 使用排气式避雷器; (b) 使用 FS 型避雷器

在电机的中性点引出的情况下, 需在中性点加装避雷器以保护中性点绝缘。考虑到可能存在单相接地故障的同时又有雷电波侵入, 此时中性点将出现相电压, 所以中性点避雷器的灭弧电压应大于相电压。保护中性点的避雷器可按表 8-7 选择。若中性点未引出, 则需将母线并联电容增大至  $1.5\sim 2.0\mu\text{F}$ , 以进一步降低入侵波陡度至  $2\text{kV}/\mu\text{s}$  以下, 确保中性点绝缘的安全。

表 8-7 保护电机中性点绝缘的避雷器

电机额定电压 (kV)	3	6	10
避雷器型式	FCD-2 FZ-2	FCD-4 FZ-4	FCD-6 FZ-6

若无合适的排气式避雷器, 也可用阀型避雷器  $FS_1$  和  $FS_2$  代替, 如图 8-23 (b) 所示。当 FS 放电后, 由于 FS 残压的作用, 电缆芯线与外皮之间并未短接, 这会使电缆段的限流效果降低。因此将避雷器前移至  $FS_1$ , 这段架空线路用避雷线保护,

利用避雷线与导线间的耦合增加限流作用, 并可将电抗器前面和中性点的避雷器均改为 FCD 型磁吹避雷器, 以增加可靠性。

容量较小 ( $6\,000\text{kW}$  以下) 或少雷区的直配电机可不用电缆进线段, 其保护接线如图 8-24 所示。在进线保护段长度  $l_0$  内应装设避雷针或避雷线,  $FE_1$  动作后的等值电路如图 8-24 (b) 所示, 流经 FCD 的雷电流与  $FE_1$  的接地电阻  $R$  有关。 $R$  愈小, 流经 FCD 的雷电流愈小; 进线长度愈长, 其等值电感  $L$  愈大, 则流经 FCD 的雷电流愈小。进线保护段长度与排气式避雷器接地电阻的关系应符合下列要求:

$$\text{对 } 3、6\text{kV 线路} \quad \frac{l_0}{R} \geq 200 \quad (8-28)$$

$$\text{对 } 10\text{kV 线路} \quad \frac{l_0}{R} \geq 150 \quad (8-29)$$

式中  $l_0$ ——进线保护段长度, m;

$R$ ——接地电阻,  $\Omega$ 。

进线保护段长度一般采用 450~600m。

在进线保护段上如有排气式避雷器 FE2, 接地电阻  $R$  可取两组排气式避雷器 FE1 和 FE2 接地电阻的并联值。

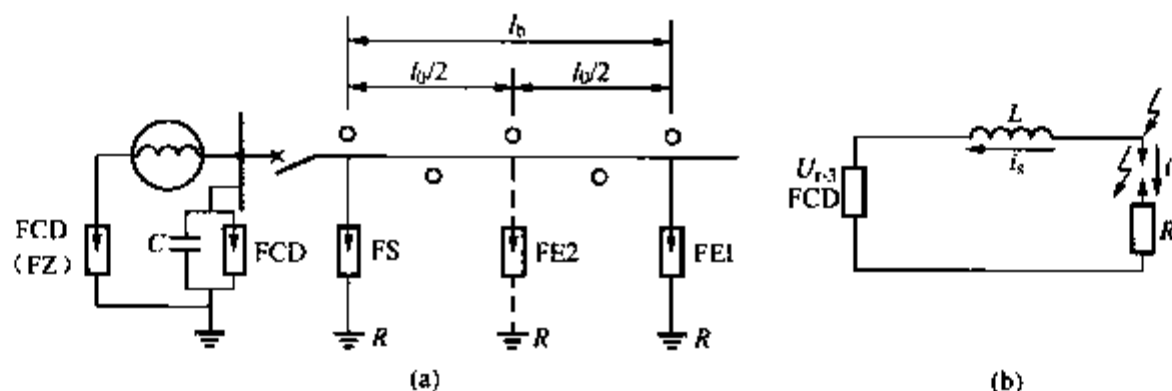


图 8-24 1500 ~ 6000kW 直配电机和少雷区 60000kW

以下直配电机的保护接线图

(a) 原理接线; (b) 等值计算电路

考虑到对直配电机的防雷保护还不能达到十分可靠的地步, 故我国规定 60000kW 以上的发电机不宜与架空线直接相连。

对于经变压器与架空线路连接的发电机, 其上所受到的过电压须经过变压器绕组之间的静电和电磁传递, 防雷可靠性比直配电机大得多, 但仍发生过雷害事故。所以应采取一定的保护措施。如发电机与升压变压器之间的母线桥或组合导线无金属屏蔽部分的长度大于 50m, 应采取防止感应过电压的措施, 在发电机回路或母线的每相导线上装设不小于  $0.15\mu\text{F}$  的电容或旋转电机阀式避雷器。运行经验表明, 在变压器后面电机侧装设 FCD 型避雷器或 ZnO 避雷器是有保护作用的。所以, 在多雷区, 经变压器送电的重要发电机, 在其出线上宜装设一组磁吹阀型避雷器或氧化锌避雷器。

## 小 结

发电厂、变电站的防雷包括两个方面: 一是防止直击雷过电压; 二是防止沿线侵入的雷电波对设备造成的危害。

对直击雷过电压一般采用避雷针或避雷线进行的保护。避雷针(线)的设置应使需要保护的设备均处于避雷针(线)的保护范围之内, 且不应发生反击事故。为了节约投资, 对 110kV 及以上的配电装置可采用架构避雷针。35kV 及以下的配电装置和变压器, 为了防止反击事故的发生, 只能采用独立避雷针进行保护。

对雷击输电线路时沿线路侵入的雷电波, 主要的保护措施是在发电厂、变电站内装设阀型避雷器或氧化锌避雷器以限制入侵雷电波的幅值。为了可靠地保护电气设备, 应装设可靠的进线段保护以限制流过避雷器的雷电流幅值和雷电波的陡度, 降低避雷器的残压和因避雷器与被保护设备之间的距离而引起的电压升高。

旋转电机的绝缘水平相对较低, 所以需要可靠的保护措施。除了需要保护主绝缘外, 还需保护电机的匝间绝缘和中性点绝缘。若电机直接与架空线路连接, 沿线侵入的雷电波可直接作用在电机的绝缘上, 需要采用 FCD 型避雷器或氧化锌避雷器与电容器、电缆段和排气

式避雷器等构成的联合保护措施。对于多雷区的非直配电机或大容量电机,应在发电机出口处装设避雷器进行保护。

## 习 题

- 8-1 发电厂、变电站直击雷防护的基本原则是什么?
- 8-2 什么叫反击?如何防止发电厂、变电站的反击事故?
- 8-3 如何防护沿着线路入侵到变电站的行波过电压?
- 8-4 自耦变压器在防雷保护方面有什么特点?
- 8-5 为什么对旋转电机的防雷保护要给予特别重视?

## 第九章 电力系统内部过电压

在电力系统中,除了前面所介绍的雷电过电压外,还经常出现另一类过电压——内部过电压。由于断路器操作、故障或其他原因,使系统参数发生变化,引起系统内部电磁能量的振荡转化或传递引起的电压升高,称为电力系统内部过电压。

内部过电压的能量来源于系统本身,所以其幅值与系统标称电压成正比。一般将内部过电压幅值与系统最高运行相电压幅值之比,称为内部过电压倍数,表征过电压的高低。内部过电压倍数与系统结构、中性点运行方式、各组成元件的性能参数、故障性质及操作过程等因素有关,并具有明显的统计性。

内部过电压分两大类,即因操作或故障引起的瞬间(以毫秒计)电压升高,称操作过电压;在瞬间过程完毕后出现的稳态性质的工频电压升高或谐振现象,称暂时过电压。暂时过电压具有稳态性质,但只是短时存在或不允许其持久存在。相对于正常运行时间,它是“暂时”的。

暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压。电力系统中的空载长线路电容效应、不对称接地和突然甩负荷均能引起工频过电压;由于操作或故障使系统中电感元件与电容元件参数匹配时,会出现谐振,产生谐振过电压,因谐振回路中电感元件的特性不同,谐振过电压有线性谐振、参数谐振和非线性谐振过电压(铁磁谐振)三种。

### 第一节 切除空载线路过电压

切除空载线路是电力系统中常见操作之一。切除空载线路时,若断路器触头间有电弧重燃现象,则被切除的线路会通过回路中电磁能量的振荡,从电源处继续获得能量并积累起来,形成过电压。这种过电压不仅幅值高,持续时间也较长。目前被作为选择超高压长线路绝缘水平的重要因素之一。

#### 一、发展过程

切除空载线路的单相等值电路如图 9-1 所示,图中  $C_2$  为线路等值电容,  $L_2$  为线路等值电感,因线路等值感抗  $\omega L_2$  远远小于线路等值容抗  $1/\omega C_2$ ,故空载线路为容性负载; QF 为线路电源侧断路器;  $C_1$  为电源侧对地电容,  $L_1$  为电源等值漏感,  $e(t)$  为电源电动势  $e(t) = E_m \cos \omega t$ 。

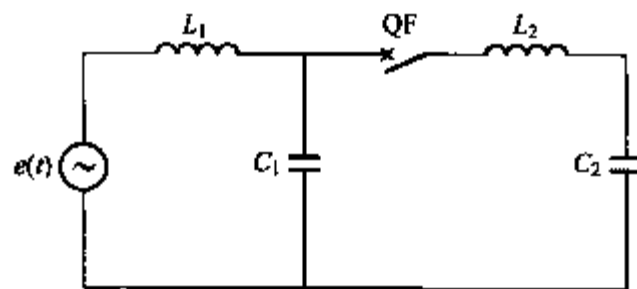


图 9-1 切空载线路等值电路

以下讨论中所设定断路器开断过程中的重燃和熄弧时刻,是以导致形成最大过电压为条件进行分析得到的。参见图 9-2,当线路工频电容电流  $i(t)$  自然过零时 ( $t=t_1$ ), QF 触头间熄弧,此时  $C_2$  上的电压为  $-E_m$ ,若不考虑线路绝缘的泄漏,在熄弧后,  $C_2$  上的电压保持  $-E_m$  不变,而  $C_1$  上的电压则随电源电压按余弦规律变化。经过半个工频周期 ( $T/2=0.01s$ ),  $t=t_2$  时,断路器触头间恢复电压达最大,为  $2E_m$ ,设此时触头间介质不能承受此

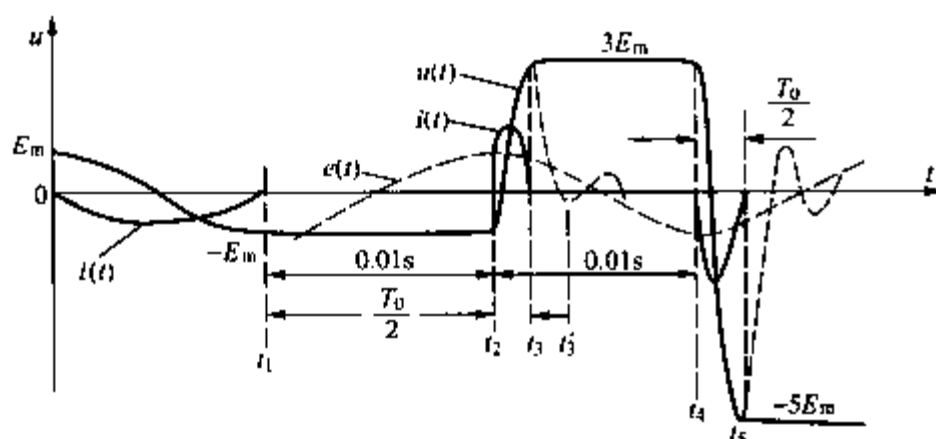


图 9-2 切除空载线路过电压的形成过程

恢复电压, 发生重燃, 则线路电容  $C_2$  上的电压要从原来的  $-E_m$  振荡过渡到稳态值  $+E_m$ 。若不计损耗, 过渡过程中出现的最大电压  $U_{2m} = 2E_m - (-E_m) = 3E_m$ 。重燃时流过断路器的电流主要是高频振荡电流, 设高频电流第一次过零时 ( $t=t_3$ ) 触头间电弧熄灭, 这时的高频振荡电压正是最大值, 线路电容  $C_2$  上保留电压  $3E_m$ 。

又经过半个工频周期,  $t=t_4$ , 触头间恢复电压为  $4E_m$ , 第二次重燃, 这时线路上的电压要从  $3E_m$  过渡到该时刻的  $-E_m$ , 振荡过程中  $C_2$  上的电压  $U_{2m} = 2(-E_m) - 3E_m = -5E_m$ , 这次振荡的高频电流在  $t=t_5$  时过零, 触头间熄弧,  $C_2$  上保持  $-5E_m$  的电压。循此以往, 直至断路器不发生重燃为止。由此可知, 切空载线路时, 断路器重燃是产生过电压的根本原因, 而且重燃次数越多, 过电压的数值越大。

## 二、影响因素和限制措施

以上分析是按最严重的条件进行的, 只是为了说明形成过电压的基本过程, 实际中切空线过电压会受到一系列复杂因素的影响, 过电压值达不到上述数值。

首先, 断路器触头重燃及电弧熄灭具有明显随机性。开断时, 不一定每次都重燃, 即使重燃也不一定在电源电压为最大值并与线路残留电压 ( $C_2$  上的电压) 极性相反时发生。若重燃提前产生, 振荡幅值及相应的过电压会随之降低。若重燃后不是在高频电流第一次过零时熄弧, 而是在高频电流第二次过零 ( $t=t'_3$ ) 或更后时间才熄弧, 则线路上残留电压大大降低, 相应地断路器触头间的恢复电压及再次重燃所引起的过电压都将大大降低。

其次, 电力系统中性点接地方式对切空载线路过电压也有较大影响。中性点直接接地的系统, 三相基本上各自成独立回路, 切空载线路过程可近似按单相电路处理。而中性点不接地或经消弧线圈接地的系统, 因三相断路器动作不同期及三相熄弧时间的差异等因素, 会形成瞬间的不对称电路, 中性点将发生电压位移。通常, 中性点不接地系统过电压要比中性点有效接地系统增大 20% 左右。若考虑中性点不接地系统在带单相接地时开断空载线路, 则其重燃后的振荡是在线电压基础上进行的, 形成的切空载线路过电压将接近于中性点直接接地系统的  $\sqrt{3}$  倍。在中性点直接接地的 110kV 和 220kV 系统中, 我国曾进行过大量的切空载线路试验, 实测过电压一般不大于 3 倍, 并符合正态分布规律。

另外, 当母线上有其他出线时, 相当于加大了母线的对地电容。在断路器重燃瞬间, 断开线路上的残余电荷迅速在各条线路对地电容间重新分配, 使线路上的起始电压与该瞬间的电源电压差别减小, 从而降低了过电压。当过电压较高时, 线路上会产生强烈的电晕, 引起能量损耗, 从而也会限制过电压的升高。

限制切空载线路过电压的最根本措施是设法消除断路器的重燃现象。这可从两方面着手: 一是改善断路器结构, 提高触头间介质的恢复强度和灭弧能力, 避免重燃。目前, 我国生产的空气断路器, 带压油式灭弧装置的少油断路器以及六氟化硫断路器的灭弧性能都有很大提高, 在开断空载线路时基本上不会发生重燃; 二是降低断路器触头间的恢复电压, 使之低于介质恢复强度, 也能达到避免重燃的目的, 具体办法有:

(1) 断路器触头间加装并联电阻。图 9-3 所示为带并联电阻的断路器切空载线路的示意图。开断线路  $l$  时, 主触头 QF1 先断开, 辅助触头 QF2 是闭合的,  $R$  串联在回路中, 线路中的残留电荷将通过

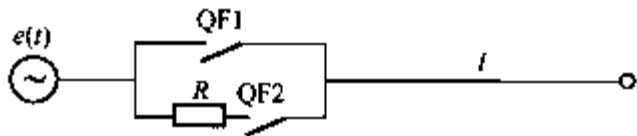


图 9-3 有并联电阻的断路器切空载线路

$R$  泄漏, 经 1~2 个工频周期, QF2 断开, 完成开断线路的动作过程。 $R$  的作用主要是降低断路器触头在开断过程中的恢复电压。主触头 QF1 开断时,  $R$  值越小, 恢复电压越低, 对避免重燃越有利, 可  $R$  越小, 接着开断辅助触头 QF2 时, QF2 上的恢复电压越大, 越易重燃, 产生振荡。虽然  $R$  有阻尼作用, 但有振荡就会出现过电压, 所以在开断 QF2 时, 希望  $R$  越大越好。为了兼顾降低两个触头恢复电压的需要, 并考虑  $R$  的热容量, 这种分闸电阻应为中值电阻, 通常取  $1\,000\sim3\,000\Omega$ 。

对灭弧性能良好的断路器, 从简化结构考虑, 可不装设分闸并联电阻。

(2) 断路器线路侧装电磁式电压互感器。当断路器开断后, 线路上的残余电荷通过互感器绕组泄放, 可使断路器两端的恢复电压下降, 避免重燃或减小重燃后产生的过电压。

(3) 线路侧接并联电抗器。当断路器触头间断弧后, 并联电抗器与线路电容构成振荡回路, 使线路上的残余电压成为交流电压。此时, 断路器两端的恢复电压呈现拍频波形, 幅值上升速度大为降低, 断路器重燃的可能性较少, 出现高幅值过电压的概率也明显下降。

(4) 采用性能良好的氧化锌避雷器。除了上述提高断路器灭弧性能、降低触头间恢复电压、避免断路器发生重燃, 从根本上抑制过电压的措施之外, 在线路首端和末端安装氧化锌避雷器, 也能有效地限制切空载线路过电压的幅值。

## 第二节 空载线路合闸过电压

合闸空载线路是电力系统常见的一种操作。空载线路合闸有两种不同的情况: 一是正常运行的计划性合闸, 如新建线路或检修后的线路按计划投入运行, 合闸前, 线路上不存在接地故障和残余电压, 合闸后, 线路电压由零值过渡到由电容效应决定的工频稳态电压。另一种线路合闸是线路故障切除后的自动重合闸。由于初始条件的差别, 重合闸过电压要比计划性合闸过电压严重。由于线路电压在合闸前后发生突变, 在此变化的过渡过程中会引起空载线路合闸过电压。这种过电压是超高压系统中的主要操作过电压, 也是超高压系统绝缘水平的决定性因素。

### 一、发展过程

下面用集中参数等值电路暂态计算的方法来分析空载线路合闸过电压的发展机理。

在计划性合闸时, 若断路器的三相完全同步动作, 则可按单相电路来进行研究, 于是可画出图 9-4 (a) 所示的等值电路, 其中空载线路用 T 型等值电路来代替,  $R_T$ 、 $L_T$ 、 $C_T$  分别为其等值电阻、电感和电容,  $e(t)$  为电源相电动势,  $R_s$ 、 $L_s$  分别为电源的电阻和电感。在作定性分析时, 还可忽略电源和线路电阻的作用, 这样就进一步简化成图 9-4 (b) 所示的简单振荡回路, 其中电感  $L = L_s + \frac{L_T}{2}$ 。

若取合闸瞬间为时间起算点 ( $t=0$ ), 则电源电动势的表达式为

$$e(t) = E_m \cos \omega t$$

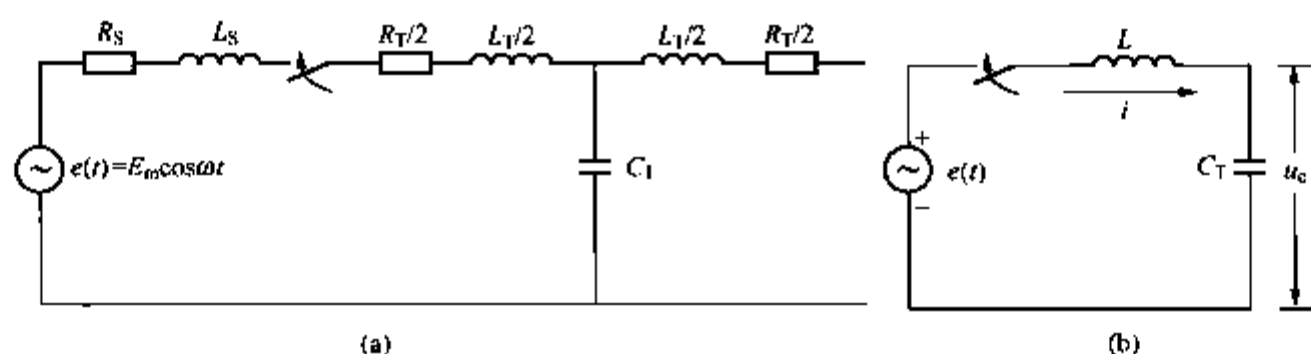


图 9-4 合空载线路过电压时的集中参数等值电路及简化等值电路

(a) 集中参数等值电路; (b) 简化等值电路

图 9-4 (b) 的回路方程为  $L \frac{di}{dt} + u_C = e(t)$

由于  $i = C_T \frac{du_C}{dt}$ , 代入上式得

$$LC_T \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = e(t) \quad (9-1)$$

先考虑最不利的情况, 即在电源电动势正好经过幅值  $E_m$  时合闸, 由于回路的自振频率  $f_0$  要比 50Hz 的电源频率高得多, 所以可以认为在振荡的初期, 电源电动势基本上保持不变, 即近似地认为振荡回路合闸到直流电源  $E_m$  的情况, 于是式 (9-1) 变成

$$LC_T \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = E_m \quad (9-2)$$

式 (9-2) 的解为

$$u_C = E_m + A \sin \omega_0 t + B \cos \omega_0 t$$

式中  $\omega_0$  —— 振荡回路的自振角频率,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_T}}$ ;

$A$ 、 $B$  —— 积分常数。

按  $t=0$  时的初始条件

$$u_C(0) = 0$$

$$i = C_T \frac{du_C}{dt} = 0$$

可求得  $A=0$ ,  $B=-E_m$ 。代入上式可得

$$u_C = E_m (1 - \cos \omega_0 t) \quad (9-3)$$

当  $t = \frac{\pi}{\omega_0}$  时,  $\cos \omega_0 t = -1$ ,  $u_C$  达到其最大值, 即  $U_C = 2E_m$

实际上, 回路存在电阻和能量损耗, 振荡将是衰减的。通常以衰减系数  $\delta$  来表示, 则式 (9-3) 将变为

$$u_C = E_m (1 - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t) \quad (9-4)$$

式中衰减系数  $\delta$  与图 9-4 中的总电阻  $(R_s + \frac{R_T}{2})$  成正比, 其波形见图 9-5 (a), 最大值  $U_C$  小于  $2E_m$ 。再者, 电源电压并非直流电源  $E_m$ , 而是工频交流电压  $e(t)$ , 这时  $u_C(t)$  表达式为

$$u_C = E_m (\cos \omega t - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t) \quad (9-5)$$

其波形见图 9-5 (b)。

如果按分布参数等值电路中的波过程来处理, 设合闸也发生在电源电压等于幅值  $E_m$  的瞬间, 且忽略电阻和能量损耗, 则沿线传播到末端的电压波  $E_m$  将在开路末端发生全反射, 使电压增加为  $2E_m$ , 这与前面的结果是一致的。

以上是计划性合闸的情况, 空载线路上没有残余电荷, 初始电压  $u_c(0) = 0$ 。如果是自动重合闸, 这时线路上有一定的残余电荷和初始电压, 重合闸时的振荡将更加激烈。

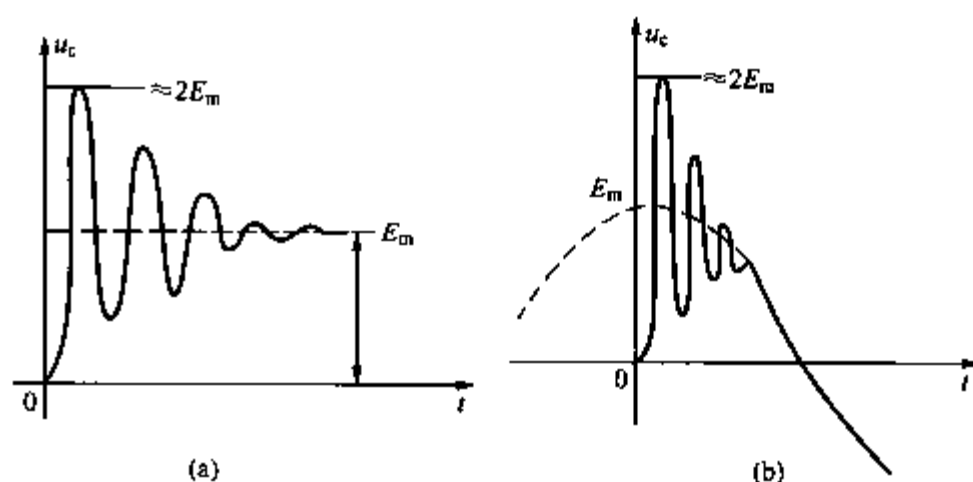


图 9-5 线路合闸过电压波形  
(a)  $u(t) = E_m$ ; (b)  $u(t) = E_m \cos \omega t$



图 9-6 中性点有效接地系统中的单相接地故障和自动重合闸示意图

例如图 9-6 中, 线路的 A 相发生单相接地故障, 设断路器 QF2 先跳闸, 然后断路器 QF1 再跳闸。在 QF2 跳闸后, 流过 QF1 健全相的电流为线路的电容电流, 所以 QF1 动作后, B、C 两相的触头间的电弧将分别在该相电容电流过零时熄灭, 这时 B、C 两相导线上的电压绝对值均为  $E_m$  (极性可能不同)。经过约 0.5s 左右, QF1 或 QF2 自动重合, 如果 B、C 两相导线上的残余电荷没有泄漏掉, 仍然保持着原有的对地电压,

那么在最不利的情况下, B、C 两相中有一相的电源电压在重合闸瞬间正好经过幅值, 而且极性与该相导线上的残余电压 (设为  $-E_m$ ) 相反, 那么重合后出现的振荡将使该相导线上出现最大的过电压, 其值为  $2E_m - (-E_m) = 3E_m$ 。

如果采用的是单相自动重合闸, 只切除故障相, 而健全相不与电源电压相脱离, 那么当故障相重合闸时, 因该相导线上不存在残余电荷和初始电压, 就不会出现上述高幅值重合闸过电压。

由上述可知: 在合闸过电压中, 以三相重合闸的情况最严重, 其过电压理论幅值可达  $3E_m$ 。

## 二、影响因素和限制措施

以上分析也是按最严重的条件进行的, 实际中过电压的幅值会受到一系列因素的影响, 主要有:

(1) 合闸时电源电压的相位角  $\theta$ 。试验表明, 电源电压在合闸瞬间的相位角是一个随机量, 遵从统计规律, 它与断路器合闸速度及合闸过程中的预击穿特性有关。所谓预击穿是指断路器触头在机械上未闭合前, 触头间电位差已将介质击穿, 使触头在电气上先接通。只要合闸不是在电源电压接近幅值时发生, 合闸过电压就不会很高。

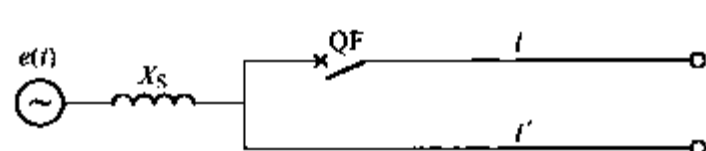
(2) 线路残余电压的极性和大小。重合闸时线路上留有残余电压, 其大小取决于线路绝缘子表面的泄漏, 残余电压越高, 且其极性与合闸瞬间电源电压极性相反时, 合闸过电压越高。如果线路侧接有电磁式电压互感器, 那么它的等值电感、电阻与线路电容构成一阻尼振

荡回路,使残余电荷在几个工频周期内便泄放一空,从而降低合空载线路过电压的数值。

超高压线路常接有并联电抗器,线路上残留电荷将通过电抗器呈现弱阻尼的振荡放电,若线路补偿度较高,会使放电回路的振荡频率接近工频,即此时的残余电压是接近工频的交流电压。在重合闸时,其大小和极性与电源电压的大小和极性之间的差异,更具有随机性。

(3) 线路损耗。线路上的能量损耗主要来自线路电阻的有功损耗以及过电压超过线路起晕电压后的电晕损耗,这些都能降低过电压。

(4) 母线上接有其他线路。如图 9-7 所示,母线上接有其他一定长度的线路  $l'$  ( $l' \geq l$ ),当断路器 QF 合闸线路  $l$  时,首先已合闸线路  $l'$  与被合闸线路  $l$  之间有较高频率的电荷重新分配过程,其后是电源对接于母线上的所有线路的低频率的充电过程,分析可知,无论被合闸线路上电压初始值和合闸的相位如何,经电荷重新分配后,总会使合闸过渡过程的起始值与稳态值更接近,降低了过电压。再是,母线上的其他线路  $l'$  越长,合闸时吸收被合闸线路  $l$  的振荡能量越多,降压作用也越大。



另外,断路器三相不同期动作,会使过电压升高。

针对过电压的形成及其影响因素,限制合闸过

图 9-7 线路合闸时母线上有其他出线 电压的主要措施有以下几种。

(1) 采用单相(故障相)自动重合闸。因故障相的初始电压为零,重合闸时不会出现高幅值的过电压。

(2) 采用带有合闸电阻的断路器。它是限制合空线过电压最有效的措施。并联合闸电阻的接法与图 9-3 中的分闸电阻相同,不过这时应先合 QF2、后合 QF1。整个合闸过程的两个阶段对阻值的要求是不同的:在合 QF2 的第一阶段, $R$  对振荡起阻尼作用,使过渡过程的过电压最大值有所降低, $R$  越大,阻尼作用越大,过电压就越小,所以希望选用较大的阻值;大约经过  $8 \sim 15\text{ms}$ ,开始合闸的第二阶段,QF1 闭合,将  $R$  短接,使线路直接与电源相连,完成合闸操作。在第二阶段, $R$  越大,过电压也越大,所以希望选用较小的阻值。在同时考虑两个阶段相互矛盾的要求后,可找出一个适中的阻值,以便同时照顾到两方面的要求,这个阻值一般处于  $400 \sim 1000\Omega$  的范围内。与前面介绍的分闸电阻(中值)相比,合闸电阻应属于低值电阻。针对我国一般情况,500kV 断路器使用的合闸并联电阻值取为  $400\Omega$ 。

顺此提及,断路器带有合闸电阻,会使断路器结构复杂,造价增加。在一定条件下,如电源容量不太小( $\geq 100\text{MW}$ )、线路长度较短( $< 100\text{km}$ )、合闸过电压不高时,仍可选用不带合闸电阻的线路断路器。

(3) 同步合闸。借助于专门装置,控制断路器在两端电位同极性时合闸,甚至要求在触头间电位差接近零时完成合闸动作,以使合闸暂态过程降低至最微弱的程度。这种同步断路器已在外国试制成功。

(4) 采用避雷器保护。在线路首端和末端安装性能良好的金属氧化物避雷器或复合式避雷器,可限制线路合闸过电压。在我国,要求避雷器在断路器并联电阻失灵或其他意外情况出现较高幅值的过电压时能可靠动作,将过电压限制在允许范围内,即避雷器是作为后备保护配置的。

在操作过电压作用下,流过避雷器的电流一般小于雷电流,但其持续时间长,且可能多次动作,对避雷器通流容量及熄弧能力(指有间隙避雷器)的要求较高。用避雷器限制操作过电压与限制雷电过电压类似,主要以避雷器额定电压及操作波电流下的残压表示其保护性能。具体数值决定于系统情况及避雷器元件性能,要满足电力系统绝缘配合的要求。避雷器限制操作过电压也有其保护范围。例如,过电压波使线路末端避雷器动作,相当于产生了一个反极性的电压波沿线向线路首端传播,波到达之处,过电压才会下降。设线长为 $l$ ,波速为 $v$ ,则在时间不大于 $\tau = \frac{l}{v}$ 时,线路首端的操作过电压很可能已越过最大值,因而线路末端避雷器一般不能限制线路首端过电压。同样,线路首端避雷器一般也不能限制线路末端过电压。通常,保护范围可达 $100 \sim 200\text{km}$ 。在超高压系统中,线路较长,大多是两端供电,因此需在线首、线末同时装设避雷器。

### 第三节 切除空载变压器过电压

在电力系统运行中,经常会遇到切除空载变压器、并联电抗器、消弧线圈及电动机等小电感负荷的操作,这时由于被开断的感性元件中所储存的电磁能量释放,产生振荡,将形成分闸过电压。这里以切空变为例进行分析。

#### 一、发展过程

切除空载变压器的等值电路如图9-8所示,图中 $L_s$ 为电源等值电感, $C_s$ 为电源侧对地杂散电容, $L_k$ 为母线至变压器连线电感,QF为断路器, $L$ 为空载变压器励磁电感, $C$ 为变压器对地杂散电容与变压器侧全部连线及电气设备对地电容的并联值, $e(t)$ 为电源电动势, $e(t) = E_m \cos \omega t$ 。

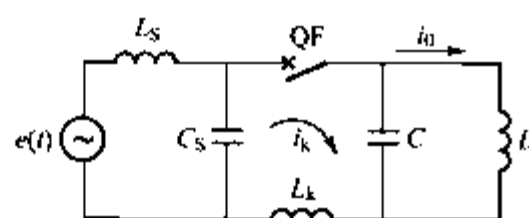


图9-8 切空变单相等值电路

切除空载变压器时,流过断路器QF的电流为变压器的励磁电流 $i_0$ , $i_0 = I_m \sin \omega t$ ,通常 $i_0$ 为额定电流的 $0.5\% \sim 5\%$ ,有效值约几安至几十安。用断路器开断此电流的过程与断路器灭弧性能有关,如一般多油断路器,切断小电流的熄弧能力较弱,通常不会产生在电流过零前熄弧的现象;而压缩空气断路器、压油式少油断路器、真空断路器等,其灭弧能力与开断电流大小关系不大,当它开断很小的励磁电流时,可能会在励磁电流自然过零前被强制截断,甚至在接近幅值 $I_m$ 时被截断。截流前后变压器上的电流、电压波形如图9-9所示。由于断路器将励磁电流突然截断,使回路电流变化

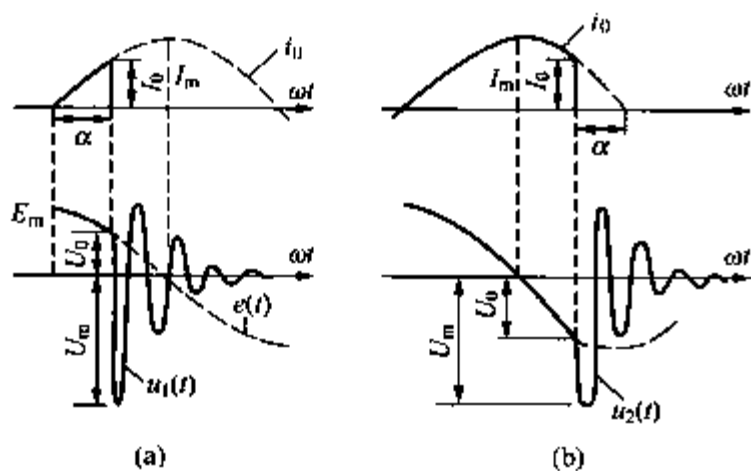


图9-9 截流前后变压器的电流、电压波形  
(a) 在 $i_0$ 上升部分截流, (b) 在 $i_0$ 下降部分截流

于断路器将励磁电流突然截断,使回路电流变化 $\frac{di}{dt}$ 甚大,在变压器绕组电感 $L$ 上产生的压降 $L \frac{di}{dt}$ 也甚大,形成了过电压。假设断路器截流时, $I_0 = I_m \sin \alpha$ , $U_0 = E_m \cos \alpha$ ,此刻,变压器储存的电场能 $W_C$ 和磁场能 $W_L$ 分别为

$$W_C = \frac{1}{2} C U_0^2 = \frac{C}{2} E_m^2 \cos^2 \alpha$$

$$W_L = \frac{1}{2} L I_0^2 = \frac{L}{2} I_m^2 \sin^2 \alpha$$

QF 开断后, 上述能量将在图 9-8 所示的  $L \sim C$  回路中产生振荡。当回路所储存总能量全部转化为电场能时, 电容  $C$  上的电压为  $U_m$ , 则有  $W_L + W_C = \frac{1}{2}CU_m^2$ , 故得

$$U_m = \sqrt{U_0^2 + \frac{L}{C}I_0^2} = \sqrt{E_m^2 \cos^2 \alpha + \frac{L}{C}I_m^2 \sin^2 \alpha} \quad (9-6)$$

截流后振荡电压  $u(t)$  的表达式可由回路微分方程求解获得。若略去回路损耗, 回路自振角频率为  $\omega_0$ , 对应于图 9-9 (a) 的截流情况 (截流发生在工频电流上升部分), 有

$$u_1(t) = U_0 \cos \omega_0 t - I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega_0 t \quad (9-7)$$

实验表明, 截流也有可能发生在工频电流下降部分, 如图 9-9 (b) 所示, 对应于此, 则有

$$u_2(t) = -U_0 \cos \omega_0 t - I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega_0 t \quad (9-8)$$

图 9-9 中所示  $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$  波形是考虑损耗衰减的, 与表达式所示有差异。

截流后过电压倍数  $K_n$  为

$$K_n = \frac{U_m}{E_m} = \frac{\sqrt{E_m^2 \cos^2 \alpha + \frac{L}{C}I_m^2 \sin^2 \alpha}}{E_m} \quad (9-9)$$

已知  $I_m \approx \frac{E_m}{2\pi fL}$  (因  $\frac{1}{\omega C} > \omega L$ )、 $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ , 代入式 (9-9) 得

$$K_n = \sqrt{\cos^2 \alpha + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2 \alpha} \quad (9-10)$$

实际上, 磁场能量转化为电场能量的过程中必然有损耗, 如铁芯的磁滞和涡流损耗、导线的铜耗等, 其中以磁滞损耗为主。因此式 (9-10) 中代表磁能项  $\left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2 \alpha$  应加以修正, 需乘以小于 1 的能量转化系数  $\eta_m$ ,  $\eta_m$  值与绕组铁芯材料特性及振荡频率有关, 频率越高,  $\eta_m$  越小。通常,  $\eta_m$  值在 0.3~0.5 范围内。于是式 (9-10) 应改写为

$$K_n = \sqrt{\cos^2 \alpha + \eta_m \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2 \alpha} \quad (9-11)$$

当励磁电流为幅值  $I_m$  时被截断, 即  $\alpha = 90^\circ$  时, 切空变过电压倍数  $K_n$  为最高。此时,

$$K_n = \frac{f_0}{f} \sqrt{\eta_m} \quad (9-12)$$

回路自振荡频率  $f_0$  与变压器的参数和结构有关, 一般高压变压器的  $f_0$  值最高可达工频的 10 倍左右, 超高压大容量变压器的  $f_0$  值则只有工频的几倍, 相应的过电压较低。

## 二、影响因素和限制措施

切空变过电压的大小与断路器的性能、变压器参数和结构型式以及与变压器相连的线路有关。上面的分析中, 假定断路器截流后触头间不发生重燃。实际上, 截流后变压器回路的高频振荡使断路器的端口恢复电压上升甚快, 极易发生重燃。若考虑重燃因素, 切空载变压器过电压将有所下降。变压器  $L$  越大,  $C$  越小, 过电压越高。当电感中的磁场能量不变, 电容越小时, 过电压也越高。此外, 变压器的相数、绕组连接方式、铁芯结构、中性点接地方

式、断路器的断口电容以及与变压器相连的电缆线段、架空线段等，都会影响切空变过电压。

目前限制切空载变压器过电压的主要措施是采用避雷器。切空载变压器过电压幅值虽较高，但持续时间短，能量不大，用于限制雷电过电压的避雷器，其通流容量完全能满足限制切空载变压器过电压的要求。用来限制切空载变压器过电压的避雷器应接在断路器的变压器侧，保证断路器开断后，避雷器仍与变压器相连。此外，此避雷器在非雷雨季节也不能退出运行。若变压器高、低压侧中性点接地方式相同，则可在低压侧装避雷器来限制高压侧切空变产生的过电压。

#### 第四节 间歇电弧接地过电压

运行经验表明，电力系统中的大部分故障（60%以上）是单相接地故障。在中性点不接地系统中，发生稳定性单相接地时，非故障相对地电压将升至线电压，但电源三相线电压仍对称，因此不必立即切除线路中断供电，允许带故障运行一段时间（一般不超过2h），以便运行人员查明故障进行处理，从而提高了供电的可靠性。但当单相接地电弧不稳定，处于时燃时熄的状态时，这种间歇性电弧将导致系统中电感电容元件之间的电磁振荡，形成遍及全系统的过电压，这就是间歇电弧接地过电压，也称弧光接地过电压。这种过电压的发展过程和幅值大小与熄弧的时间有关。随情况的不同，有两种可能的熄弧时间，一种是电弧在过渡过程中的高频振荡电流过零时即可熄灭；另一种是电弧要等到工频电流过零时才能熄灭。两种理论分析所得的过电压值不同，但反映过电压形成的物理本质是相同的。

##### 一、发展过程

现采用工频熄弧理论解释间歇电弧接地形成过电压的发展过程。系统接线如图9-10所示， $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为各相对地电容。 $C_1=C_2=C_3=C_0$ 。

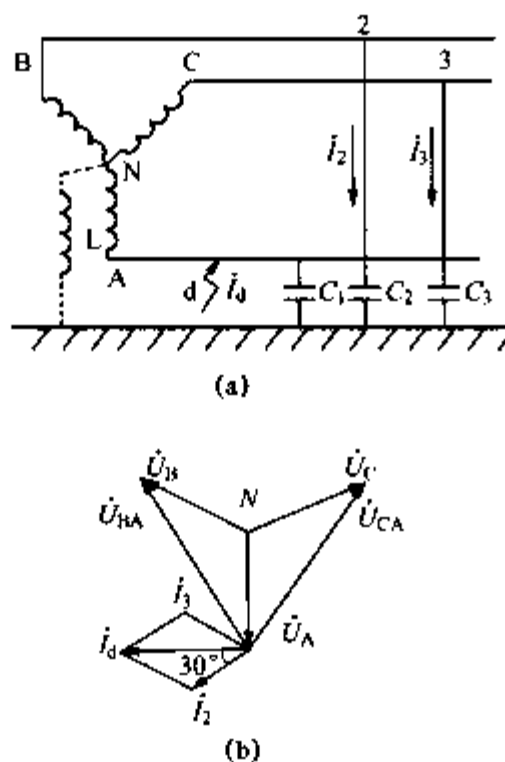


图9-10 单相接地电路图及相量图

(a) 电路图；(b) 相量图

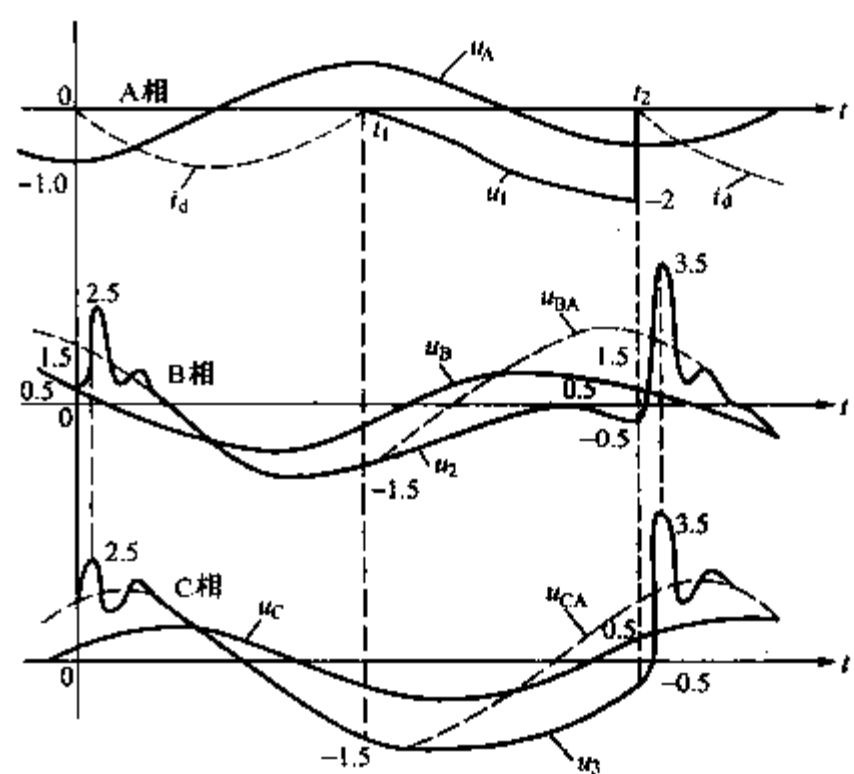


图9-11 间歇性电弧接地过电压的发展过程

(工频熄弧理论)

设三相电源电压为  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$ ，线电压为  $u_{AB}$ 、 $u_{BC}$ 、 $u_{CA}$ ，各相对地电压（即各相对地

电容上的电压)为  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ , 它们的波形如图 9-11 所示。假定 A 相电压为幅值 ( $-U_m$ ) 时对地闪络, 令  $U_m=1$ , 此时, B、C 相对地电容  $C_0$  上初始电压为 0.5, 它们将过渡到新的稳态瞬时值 1.5, 在此过渡过程中出现的最高振荡电压幅值为 2.5。其后, 振荡很快衰减, B、C 相稳定在线电压  $u_{BA}$  和  $u_{CA}$ 。同时, 接地点通过工频接地电流  $I_d$ , 其相位角比  $\dot{U}_A$  滞后  $90^\circ$ 。

经过半个工频周期 ( $t=t_1$  时), B、C 相电压等于  $-1.5$ ,  $i_d$  通过零点, 电弧自动熄灭, 熄弧前瞬间, B、C 相瞬时电压各为  $-1.5$ , A 相对地电压为零, 系统三相贮有电荷  $q=2C_0(-1.5)=-3C_0$ 。熄弧后, 设电荷无泄漏, 于是电荷将经过电源平均分配在三相对地电容中, 在系统中形成一个直流电压分量  $q/(3C_0)=-3C_0/(3C_0)=-1$ 。因此, 熄弧后导线对地电压由各相电源电压和直流电压 ( $-1$ ) 叠加而成。B、C 相电源电压为  $-0.5$ , 叠加后为  $-1.5$ , A 相电源电压为 1, 叠加后为零。因而, 熄弧前后各相对地电压不变, 不会引起过渡过程。

再经过半个工频周期 ( $t=t_2$  时), A 相对地电压高达  $-2$ , 设此时发生重燃, 其结果使 B、C 相电压从初始值 ( $-0.5$ ) 向线电压瞬时值 1.5 振荡, 过渡过程中最高电压为  $2 \times 1.5 - (-0.5) = 3.5$ 。振荡衰减后, B、C 相仍稳定在线电压运行。

以后每隔半个工频周期, 将依次发生熄弧和重燃, 其过渡过程与上述过渡过程完全相同, 非故障相的最大过电压为 3.5 倍, 故障相最大过电压 2 倍。

## 二、影响因素和限制措施

影响间歇接地电弧过电压大小的因素主要有:

(1) 电弧过程的随机性。间歇性电弧的燃烧及熄灭的随机性是影响过电压的主要因素。实际电弧过程不可能像理论分析所假定的那样严格划一, 不会都处于最严重的情况, 因而实测过电压一般低于理论分析值。

(2) 导线相间电容  $C_{12}$  的影响。参看图 9-10, 在第一次重燃前, 非故障相  $C_0$  上的电压为  $-0.5$ ,  $C_{12}$  上的电压为 1.5, 对地燃弧后, 两者并联, 使振荡的起始电压从  $-0.5$  变为  $(-0.5C_0 + 1.5C_{12}) / (C_0 + C_{12}) > (-0.5)$ , 这比不考虑  $C_{12}$  时更接近 1.5, 因而使过渡过程的过电压值降低。

(3) 电网损耗电阻的影响。如电源内阻、线路导线电阻、接地电弧的弧阻等, 使振荡回路存在有功损耗, 加强了振荡的衰减。

(4) 对地绝缘泄漏电导的影响。电弧熄灭后, 电网对地电容中的残余电荷将通过线路绝缘泄漏, 电荷泄漏的快慢与线路绝缘表面状况及气象条件等因素有关。电荷泄漏使系统中性点位移电压减小。相应地, 间歇电弧接地过电压有所降低。

实际系统中间歇电弧接地过电压倍数大部分小于 3.1, 具有正常绝缘水平的电气设备是能承受的。但这种过电压持续时间较长, 而且遍及全系统, 对系统内绝缘较低的设备 and 个别绝缘弱点会构成较大威胁, 甚至可能引起设备损坏和大面积停电的事故。

为了限制间歇电弧过电压, 最根本的办法就是消除间歇电弧, 这可以通过改变中性点接地方式来实现, 主要措施有二: 一是将系统中性点直接接地 (或经小阻抗接地), 使系统在单相接地时引起较大的短路电流, 继电保护装置会迅速切除故障线路。故障切除后, 线路对地电容中贮存的剩余电荷直接经中性点入地, 系统中不会出现间歇电弧接地过电压。但配电网发生单相接地的概率较大, 中性点直接接地, 断路器将频繁动作开断短路电流, 大大增加

维护的工作量,并要求有可靠的自动重合闸装置与之配合,故应权衡利弊,经技术经济比较后选定;二是中性点经消弧线圈接地,消弧线圈是一个铁芯带有气隙的电感线圈,其伏安特性相对来说不易饱和。电力系统正常运行时,由于系统中性点电位很低,所以流过消弧线圈的电流很小、损耗也很小。当系统发生单相(如A相)接地故障时,如图9-10所示,中性点对地电压上升为 $-\dot{U}_A$ ,此时流过接地点的电弧电流除了原先的电容电流 $I_d$ 外,还增加了流过消弧线圈的电感电流 $I_L$ , $I_L$ 与 $I_d$ 反相。由图9-10(b)所示相量图可知,流过故障点的电容电流 $|I_d|=3\omega C_0 U_{\varphi}$  ( $U_{\varphi}$ 为电源相电压幅值),而 $|I_L|=\frac{U_{\varphi}}{\omega L}$ ,如果调节 $L$ 值,使

$|I_L|=|I_d|$ ,则二者将相互抵消,这时称为全补偿,此时的电感值 $L=\frac{1}{\omega^2 3C}$ 。若调节 $L$ 值,使 $|I_L|>|I_d|$ 时,称为过补偿, $|I_L|<|I_d|$ 时,称为欠补偿。从消弧的角度看,采用全补偿无疑是最佳方案,但在实际电网中,由于其他多方面的原因(特别是为了避免中性点位移电压过高),一般均采用过补偿的运行方式。

消弧线圈的运行主要就是调谐值(即 $L$ 值)的整定,在选择消弧线圈的调谐值时,应使单相接地时流过故障点的残流处在能可靠自动消弧的范围内;电网正常运行和发生故障时,中性点电压位移不应升高到危及绝缘的数值。由于这两个要求是相互矛盾的,因此实际中只能采取折中的方案来同时满足两方面的要求。

## 第五节 工频电压升高

在正常或故障运行时,电力系统中所出现的幅值超过最大工作相电压、频率为工频或接近工频的电压升高,称为工频电压升高或工频过电压。这种过电压对系统正常绝缘的电气设备一般没有危险,但在确定超高压远距离输电绝缘水平时,却起着重要作用,主要原因如下。

(1) 工频电压升高的大小将直接影响操作过电压的幅值。

(2) 工频电压升高的大小将影响保护电器的工作条件和效果。例如避雷器的额定电压必须大于连接点的工频电压升高值,在同样的保护比下,一般是避雷器额定电压越高,残压值也越高,相应被保护设备的绝缘水平也越高。

(3) 工频电压升高持续时间长,对设备绝缘及其运行性能有重大的影响,如油纸绝缘内部游离、污秽绝缘子闪络、铁心过热、电晕及其干扰等。

在我国超高压系统中,要求线路侧工频过电压不大于最高运行相电压的1.4倍,母线侧不大于1.3倍。

下面将分别介绍电力系统中常见的几种工频电压升高的产生机理及限制措施。

### 一、空载长线路电容效应引起的工频过电压

一般空载长线路的工频容抗 $X_C$ 远大于工频感抗 $X_L$ ,在电源电动势 $E$ 的作用下,线路中通过的电容电流在感抗上的压降 $U_L$ 将使容抗上的电压 $U_C$ 高于电源电动势, $U_C=E+U_L$ 。即空载长线路上的电压将高于电源电压,这就是空载长线路的电容效应引起的工频过电压。

设三相线路均匀、对称,并不考虑大地回路的影响,在略去线路电阻 $r_0$ 、对地电导 $g_0$ 条件下,因长距离输电线路具有分布参数特征,故按通用长线方程可得出线末电压 $\dot{U}_2$ 和线

末电流  $I_2$  为已知值时的无损线路稳态方程为

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \alpha x + I_2 Z \operatorname{sh} \alpha x \quad (9-13)$$

$$I_x = I_2 \operatorname{ch} \alpha x + \frac{\dot{U}_2}{Z} \operatorname{sh} \alpha x \quad (9-14)$$

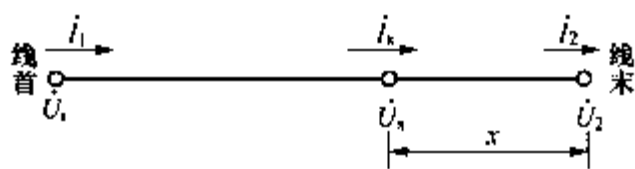


图 9-12 空载长线路

以上二式中各参数可参见图 9-12 所示单相线路图。 $\dot{U}_x$  和  $I_x$  为以线路末端作起点计算距离为  $x$  处的线路电压和电流； $\alpha$  是线路相位系数， $\alpha = \omega/v$ ， $\omega$  为频率， $v$  为光速，架空输电线路的  $\alpha = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2 \times 180^\circ \times 50}{3 \times 10^5} / \text{km} =$

$0.06^\circ / \text{km}$ ； $Z$  为无损线路的波阻抗。

由于  $\operatorname{ch} \alpha x = \cos \alpha x$ ， $\operatorname{sh} \alpha x = j \sin \alpha x$ ，式 (9-13)、式 (9-14) 可改写成

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cos \alpha x + j I_2 Z \sin \alpha x \quad (9-15)$$

$$I_x = I_2 \cos \alpha x + j \frac{\dot{U}_2}{Z} \sin \alpha x \quad (9-16)$$

对于空载线路， $I_2 = 0$ ，则有

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cos \alpha x \quad (9-17)$$

$$I_x = j \frac{\dot{U}_2}{Z} \sin \alpha x \quad (9-18)$$

当线路长度  $x=l$  时，由式 (9-17) 得

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\cos \alpha l} \quad (9-19)$$

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_1}{\cos \alpha l} \cos \alpha x \quad (9-20)$$

式 (9-19) 表明，线路长度  $l$  越长，线路末端工频电压升高得越厉害。对于架空线路，当  $\alpha l = \frac{\pi}{2}$ ，即  $l = \frac{\pi v}{2\omega} = 1500$  (km) 时， $U_2$  趋于无穷大，此时线路处于谐振状态。

式 (9-20) 表明，均匀无损空载线路沿线电压分布呈余弦规律，线路各段导线中的电容电流值不同，沿线电压升高不均匀，线路末端电压最高。如图 9-13 所示。

线路上某点电压  $\dot{U}_x$  也可用电压传递系数表示。如线首对  $x$  点的电压传递系数  $K_{1x}$  为

$$K_{1x} = \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_1} = \frac{\cos \alpha x}{\cos \alpha l} \quad (9-21)$$

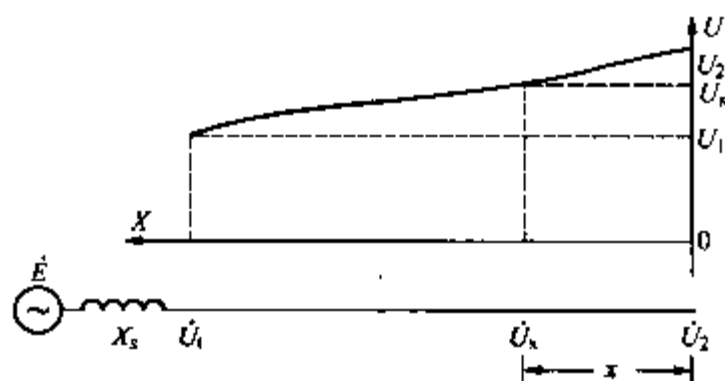


图 9-13 空载长线路沿线电压分布

为了便于计算和分析，可将线路等值为一个集中参数阻抗。如无损线路末端开路时，从首端往线路看，等值阻抗为  $Z_{\text{RK}}$  [称  $Z_{\text{RK}}$  为末端开路 ( $I_2 = 0$ ) 时的首端入口阻抗]。从式 (9-15)、式 (9-16) 得

$$Z_{\text{RK}} = \frac{\dot{U}_{\text{IK}}}{I_{\text{IK}}} = \frac{\cos \alpha l}{j \frac{\sin \alpha l}{Z}} = -j Z \cot \alpha l \quad (9-22)$$

当  $\alpha l < 90^\circ$  时， $Z_{\text{RK}}$  为容抗，可近似用电容等值。

末端短路时 ( $\dot{U}_2 = 0$ )，首端入口阻抗  $Z_{RD}$  为

$$Z_{RD} = \frac{\dot{U}_{1d}}{I_{1d}} = \frac{jZ \sin \alpha l}{\cos \alpha l} = jZ \tan \alpha l \quad (9-23)$$

当  $\alpha l < 90^\circ$  时， $Z_{RD}$  为感抗，可近似用电感等值。

以上分析仅考虑线路或者说线路连接于无穷大容量电源，如图 9-13 所示， $\dot{E}$  为电源电动势， $X_s = 0$ ， $\dot{U}_1 = \dot{E}$ 。下面分析较为实际的情况，即线路连接于有限大容量电源， $X_s \neq 0$ ， $\dot{U}_1 \neq \dot{E}$ 。应用入口阻抗的概念，线路末端开路的等值电路如图 9-14 所示，于是有

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E}}{Z_{RK} + jX_s} Z_{RK} = \frac{\dot{E} \cos \alpha l}{\cos \alpha l - \frac{X_s}{Z} \sin \alpha l} \quad (9-24)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\cos \alpha l} = \frac{\dot{E}}{\cos \alpha l - \frac{X_s}{Z} \sin \alpha l} \quad (9-25)$$

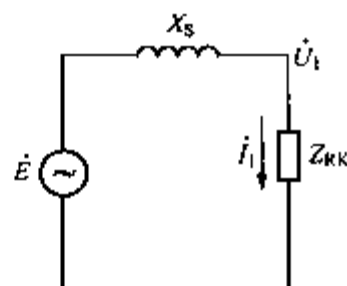


图 9-14 有限大电源带空线等值电路

令  $\varphi = \tan^{-1} \frac{X_s}{Z}$ ，式 (9-25) 可写成电压传递系数形式，即

$$K_{02} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{E}} = \frac{1}{\cos \alpha l - \tan \varphi \cdot \sin \alpha l} = \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha l + \varphi)} \quad (9-26)$$

式 (9-25) 表明， $X_s$  的存在加剧了空载长线路末端的电压升高。这是因为线路电容电流通过电源漏抗  $X_s$  时会产生电压升高，使线路首端电压  $U_1$  高于电动势  $E$ ，且线路电容电流越大，电容效应越明显。或者说， $X_s$  的存在，犹如增加了线路长度。

对单电源供电线路，估算最严重的工频电压升高时，应取最小运行方式时的  $X_s$  值为依据。对双电源供电线路，线路两侧断路器必须遵循一定的操作程序：线路合闸时，先合电源容量较大的一侧，后合电源容量较小的一侧；线路切除时，先切容量较小的一侧，后切容量较大的一侧。这样操作能降低电容效应引起的工频电压升高。

在超高压系统中，为了限制长线路的工频电压升高，通常采用并联电抗器补偿线路电容电流，削弱线路的电容效应。并联电抗器安装位置可按需要设置在线路末端、线路两侧或线路中间。随着安装位置不同，沿线电压分布也不同，总的趋势是使线路上电压分布趋于均匀和低于容许值。

## 二、不对称接地引起的工频过电压

不对称接地短路是输电线路最常见的故障形式。发生故障时，由于相间的电磁耦合，可能使健全相工频电压有所升高。统计表明，在不对称接地中，以单相接地时非故障相的电压升高最为严重。另外，单相接地时的工频电压升高值是确定避雷器灭弧电压的依据。

单相接地时，故障点三相电流和电压是不对称的，为方便计算非故障相电压升高，可采用对称分量法，通过负序网进行分析。

当线路较长时，沿线各点的电压是不等的。现设线路上某点 M 处 A 相接地，如图 9-15 所示。根据故障点 A 相电压  $\dot{U}_A = 0$ ，非故障相的故障电流  $I_b = 0$ 、 $I_c = 0$  的条件，按对称分量关系，可作出图 9-16 所示的复合序网。其中， $\dot{E}_1$  为正常运行时故障点 M 处的对地正序电压， $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_0$  分别为从故障点看进去的电网正序、负序、零序阻抗， $\dot{U}_1$  和  $I_1$ 、 $\dot{U}_2$  和  $I_2$ 、 $\dot{U}_0$  和  $I_0$  分别为电网中电压、电流的正序、负序和零序分量。由复合序网知

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (9-27)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - I_1 Z_1 \quad (9-28)$$

$$\dot{U}_2 = -I_2 Z_2 \quad (9-29)$$

$$\dot{U}_0 = -I_0 Z_0 \quad (9-30)$$

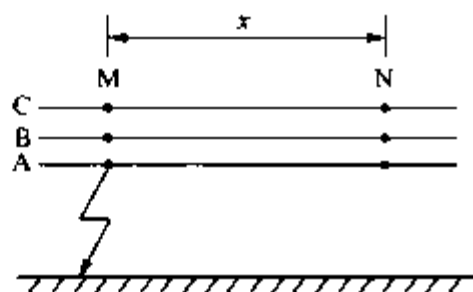


图 9-15 长线路上 M 点单相接地

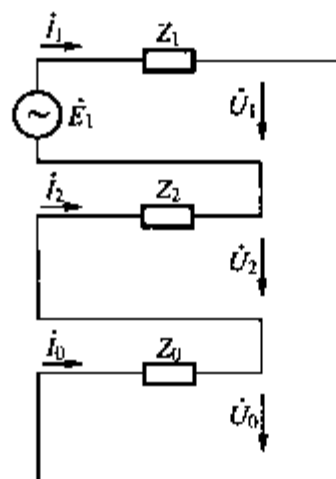


图 9-16 单相接地的复合序网络

于是, 故障点 M 处非故障相的电压为

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \quad (9-31)$$

$$\dot{U}_C = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \quad (9-32)$$

式中算子  $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。

参见图 9-12, 计算离故障点 M 有  $x$  距离的 N 点的电压时, 可引用电压传递系数来求, 即

$$\dot{U}_{NA} = k_1 \dot{U}_1 + k_2 \dot{U}_2 + k_0 \dot{U}_0 \quad (9-33)$$

$$\dot{U}_{NB} = k_1 a^2 \dot{U}_1 + k_2 a \dot{U}_2 + k_0 \dot{U}_0 \quad (9-34)$$

$$\dot{U}_{NC} = k_1 a \dot{U}_1 + k_2 a^2 \dot{U}_2 + k_0 \dot{U}_0 \quad (9-35)$$

式中,  $\dot{U}_{NA}$ 、 $\dot{U}_{NB}$ 、 $\dot{U}_{NC}$  分别为 N 点的 A 相、B 相、C 相电压;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_0$  分别为正序、负序、零序电压传递系数。当 N 点在远离电源侧、线路末端开路时, 有

$$k_1 = k_2 = \frac{1}{\cos \alpha_1 x}, \quad k_0 = \frac{1}{\cos \alpha_0 x}$$

式中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_0$  分别为线路的正序、零序相位系数。

在线路较短的情况下, 可不计沿线的工频电压升高, 即电压传递系数为 1。设  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_0$  为从故障点看进去的网络正序、负序和零序电抗, 并近似取  $X_1 = X_2$ ; 故障点在故障前相对地电压为  $\dot{U}_{A0}$ , 则由式 (9-27) ~ 式 (9-31) 的关系可得

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_{A0} - \frac{X_0 - X_1}{2X_1 + X_0} \dot{U}_{A0} \quad (9-36)$$

因故障前故障点 B 相对地电压  $\dot{U}_{B0} = a^2 \dot{U}_{A0}$ , 故

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B0} - \frac{k-1}{2+k} \dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} + \Delta \dot{U}$$

其中

$$k = \frac{X_0}{X_1}, \quad \Delta \dot{U} = -\frac{k-1}{2+k} \dot{U}_{A0}$$

同理有

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C0} + \Delta \dot{U} \quad (9-37)$$

在  $k > 1$  的情况下, 相量  $\Delta \dot{U}$  与  $\dot{U}_{A0}$  反相。非故障相电压的数值为

$$\begin{aligned} U_B = U_C &= U_{A0} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta U}{U_{A0}}\right)^2 - 2 \frac{\Delta U}{U_{A0}} \cos 120^\circ} \\ &= U_{A0} \sqrt{1 + \left(\frac{k-1}{k+2}\right)^2 + \frac{k-1}{k+2}} = \alpha U_{A0} \end{aligned} \quad (9-38)$$

式中,  $\alpha = \sqrt{3} \frac{\sqrt{1+k+k^2}}{k+2}$  称单相接地系数, 是单相接地时故障点非故障相对地电压与故障前故障相对地电压之比。 $\alpha$  与  $k$  的关系曲线见图 9-17 所示。当  $k \rightarrow \infty$  时,  $\alpha$  从较低值趋于  $\sqrt{3}$ ; 当  $k \rightarrow -\infty$  时,  $\alpha$  从较高值趋于  $\sqrt{3}$ 。当  $k = -2$  时, 出现工频谐振, 线路上各点电压趋于无穷大。

在中性点不接地系统中,  $X_0$  是线路对地容抗, 其值很大, 而  $X_1$  是感抗, 所以  $k$  必为负值。

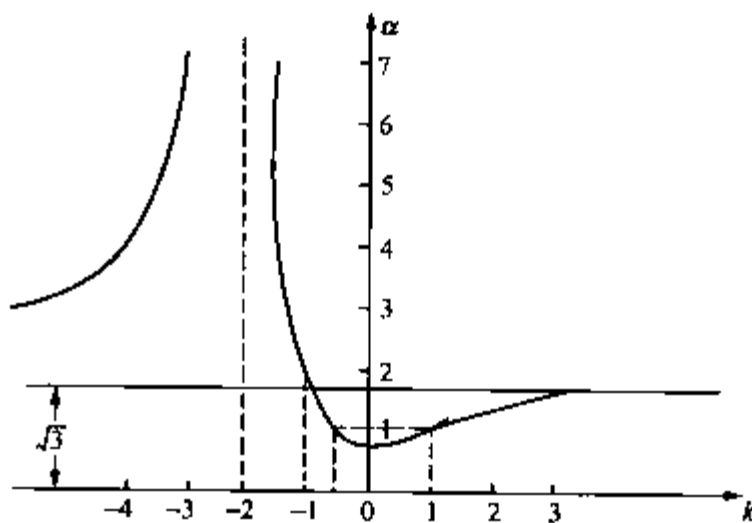


图 9-17 单相接地系数  $\alpha$  与  $k$  的关系

对中性点经消弧线圈接地的系统, 不论是

欠补偿或是过补偿, 总有  $k \rightarrow -\infty$  或  $k \rightarrow \infty$ , 故  $\alpha \rightarrow \sqrt{3}$ , 避雷器额定电压大于  $U_N$ 。

中性点直接接地或经低阻抗接地系统的  $X_0$  是感抗, 因此  $k$  是正的。110~220kV 中性点直接接地系统, 通常  $k \leq 3$ ,  $\alpha = 0.72 \times \sqrt{3}$ , 避雷器额定电压大于  $(0.75 \sim 0.8) U_N$ 。对超高压系统, 长度在 200km 以上的线路常装有并联电抗器,  $k \leq 3$ , 考虑到长线电容效应, 电站避雷器额定电压大于  $0.8 U_N$ , 线路型大于  $0.9 U_N$ 。

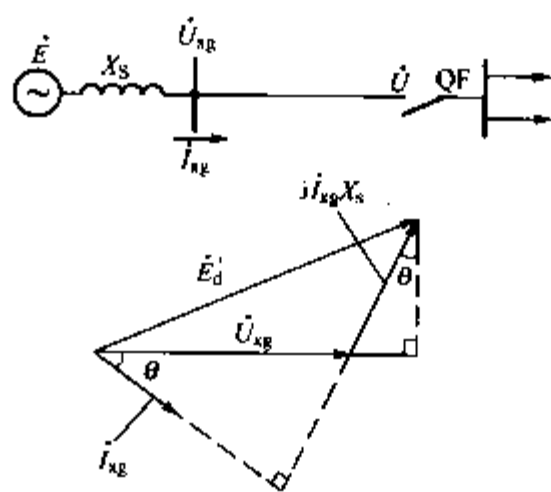


图 9-18 运行系统及相量图

### 三、甩负荷引起的工频过电压

电力系统运行时, 某种故障会使系统电源突然失去负荷。例如, 图 9-18 所示线路末端断路器 QF 突然开断, 发电机—变压器只带空载线路, 此时将出现工频过电压。

突然甩负荷瞬间, 发电机的磁链不能突变, 将维持甩负荷前正常运行时的暂态电动势  $E'_d$  不变。已知正常运行的首端电压  $U_1$  为最高运行相电压  $U_{xg}$ ; 首端电流  $I_1$  为  $I_{xg}$ ; 功率因数为  $\cos \theta$ ; 传输视在功率为  $S = 3 U_{xg} I_{xg}$ ; 发电机暂态电抗与变压器漏抗之和为  $X_s$ 。由图 9-18 所示相量关系可得

$$E'_d = \sqrt{(U_{xg} + I_{xg} X_s \sin \theta)^2 + (I_{xg} X_s \cos \theta)^2}$$

可见, 甩负荷前的传输的功率越大,  $E'_d$  值越高, 甩负荷后的工频过电压也越高。同时, 由于原动机的调速器和制动设备的情性, 不能立即达到应有的调速效果, 导致发电机加速旋转 (飞逸现象), 造成电动势和频率都上升的结果, 从而更增强了长线电容效应。

设甩负荷后发电机最高转速与同步转速之比为  $S_f$ 。相应地, 发电机励磁电动势会升高至  $S_f E'_d$ 。通常, 汽轮发电机  $S_f$  约 1.1~1.5, 水轮发电机  $S_f$  约 1.3 以上。甩负荷时空载线

路末端电压  $U_2$  为

$$U_2 = \frac{S_1 E'_d}{\cos S_1 \alpha l - \frac{S_1 X_s}{Z} \sin S_1 \alpha l} \quad (9-39)$$

上述工频电压随着转速增加常在  $1 \sim 2s$  后达最大值, 然后随调速器和电压调节器的作用而逐渐下降, 总的持续时间可达几秒钟之久。

如果空载线路的电容效应、单相接地和突然甩负荷等几种情况同时发生, 则工频电压升高可接近两倍相电压的数值。由于这种同时发生的概率甚小, 通常不予考虑。

## 第六节 谐振过电压

电力系统中的电气设备总具有电感、电容及电阻的属性, 如发电机、变压器、电抗器、消弧线圈、电磁式电压互感器、导线电感等可作为电感元件; 补偿电容器、高压设备杂散电容、导线对地电容、相间电容等可作为电容元件。在正常运行时, 这些元件的参数不会形成串联谐振, 但当发生故障或操作时, 系统中某些回路被割裂、重新组合而构成各种振荡回路, 在一定的能源作用下将产生串联谐振, 导致严重的谐振过电压。

电力系统中的阻性有功负荷是阻尼振荡、限制谐振的有利因素。通常只有在空载或轻载时才发生谐振, 但对零序回路参数配合不当而形成的谐振, 系统正序有功负荷是不起阻尼作用的。

谐振过电压持续时间比操作过电压长得多, 甚至是稳定存在, 直到破坏谐振条件为止。但某些情况下, 谐振发生一段时间后会自动消失, 不能自保持。谐振过电压的危害性既决定于幅值大小, 也决定于持续时间长短。谐振过电压会危及电气设备的绝缘, 也可能因谐振出现过电流烧毁小容量的电感元件设备 (如电压互感器)。谐振过电压的持续性质还给选择过电压保护措施造成困难。

谐振回路包含电感  $L$ 、电容  $C$  和电阻  $R$ , 通常认为系统中的  $C$  和  $R$  (避雷器例外) 是线性元件, 而电感  $L$  则有三种不同的特性: 线性电感、非线性电感和周期性变化电感。根据谐振回路中所含电感的性质不同, 相应地具有三种不同特点的谐振现象, 即线性谐振、参数谐振和非线性谐振 (铁磁谐振)。

### 一、线性谐振

对由线性电感  $L$ 、电容  $C$  和电阻  $R$  组成的串联回路, 当回路自振频率与电源频率相等或接近时, 则可能发生线性谐振。

对复杂的线性电路, 其谐振条件是: 从电源侧向外看去的工频入口阻抗的虚部为零。即此时只有阻抗的实部部分, 电源电压与相应的电流处于同相位。

图 9-18 所示为单频线性电路, 其谐振条件为

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

或

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \quad (9-40)$$

$\omega_0$  为不计回路损耗电阻  $R$  的自振角频率。

当  $R \rightarrow 0$ ,  $I \rightarrow \infty$  时,  $U_L$ 、 $U_C$  均趋于无穷大。所以,  $R$  是限制谐振过电压的唯一因素。

考虑损耗电阻  $R$  后, 回路自振角频率  $\omega'_0$  为

$$\omega'_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \mu^2}$$

其中,  $\mu = \frac{R}{2L}$ 。

通常  $R$  很小,  $\mu < \omega_0$ , 故线性谐振条件为

$$\omega'_0 \approx \omega_0$$

一般情况下, 电容  $C$  上的稳态电压  $U_C$  为

$$U_C = \frac{E}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\mu\omega}{\omega_0^2}\right)^2}} \quad (9-41)$$

限制这种过电压的方法是使回路脱离谐振状态和增加回路的损耗。在电力系统设计和运行时, 应设法避开谐振条件以消除这种线性谐振过电压。

## 二、参数谐振过电压

系统中某些元件的电感会发生周期性变化, 例如发电机转动时, 其电感的大小随着转子的位置的不同而周期性变化。当发电机带有电容性负载 (例如一段空载线路) 时, 如再存在不利的参数配合, 就有可能引发参数谐振现象, 有时将这种现象称为发电机的自励磁或自激过电压。

由于回路中有损耗, 所以, 只有当参数变化所吸收的能量 (由原动机供给) 足以补偿回路中的损耗时, 才能保证谐振的持续发展。从理论上来说, 这种谐振的发展将使振幅无限增大, 而不像线性谐振那样受到回路电阻的限制; 但实际上当电压增大到一定程度后, 电感一定会出现饱和现象, 从而使回路自动偏离谐振条件, 使过电压不致无限增大。

发电机在正式投入运行前, 设计部门要进行自激的校核, 避开谐振点, 因此一般不会出现参数谐振现象。

## 三、非线性谐振过电压

非线性谐振 (铁磁谐振) 是指发生在含有非线性电感 (如铁磁电感元件) 的串联振荡回路中的谐振。它有与线性谐振很不相同的特点。

由于谐振回路中的铁磁电感会因磁饱和程度不同而有相应不同的电感量, 所以非线性振荡回路的自振角频率不是固定的。不同的条件下, 非线性振荡回路可产生三种谐振状态: 谐振频率等于工频的工频谐振, 也称基波谐振; 谐振频率为工频整数倍 (2、3、5 倍等) 的高频谐振, 也称高次谐波谐振, 谐振频率为工频分数倍 ( $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{2}{5}$  倍等) 的分频谐振, 也称分次谐波谐振。

下面通过对基波谐振的分析, 阐明非线性谐振的基本特性。

图 9-20 所示为最简单的非线性振荡回路。图中  $E$  为工频电源电动势; 电阻  $R$ 、电容  $C$  均为线性元件;  $L$  为非线性电感元件。

铁芯电感的参数可用其瞬时值电流  $i$  和瞬时值磁链  $\Psi$  的关系曲线表示。现只讨论工频谐振, 所有的电压、电流均可用有效值表示, 铁芯电感参数用其电压、电流的有效值关系表示, 即其伏安特性曲线  $U_L = f(I)$ 。

为了清晰简便, 可采用作图法分析工频谐振电路。

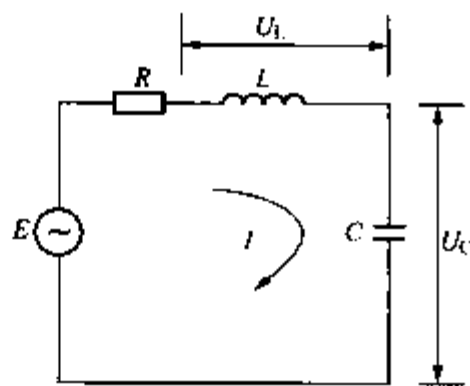
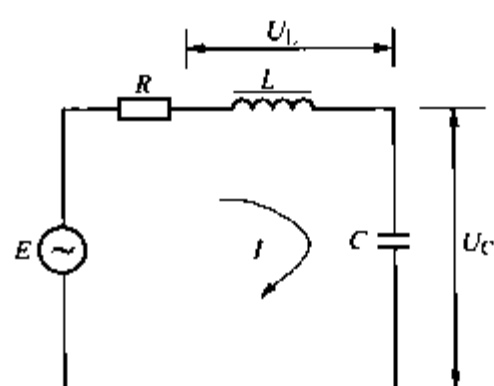


图 9-19 串联线性谐振电路



先令  $R=0$ ，对图 9-20 所示电路有  $E = U_C + U_L$ ，因  $U_C$  与  $U_L$  反相，故有

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= |U_C - U_L| \\ E &= \Delta U \end{aligned} \right\} \quad (9-42)$$

图 9-21 中画出了电容和铁芯电感的伏安特性曲线，电容  $C$  的伏安特性是一根斜直线 ( $U_C = \frac{I}{X_C}$ )，斜率是其容抗  $X_C$ 。铁

芯电感的特性曲线的起始段也是一斜直线，其斜率为起始感抗  $X_{L0}$  (因此时铁芯尚未饱和)，随电压、电流的增大，特性曲线将弯曲， $U_L$  不再是直线，这是因为铁芯磁饱和而使感抗减小。根据式 (9-42) 可在图中作出  $\Delta U = |U_C - U_L| = f(I)$  的伏安特性曲线，并知满足  $E = \Delta U$  条件的有三个工作点 ( $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ )，为鉴别这三个工作点的稳定性，可采用小扰动判别法，即对某一工作点给予扰动，使之产生微小的偏离，有相应的过渡过程，若扰动后能恢复至原先的工作点，则此工作点是稳定的，反之，是不稳定的。

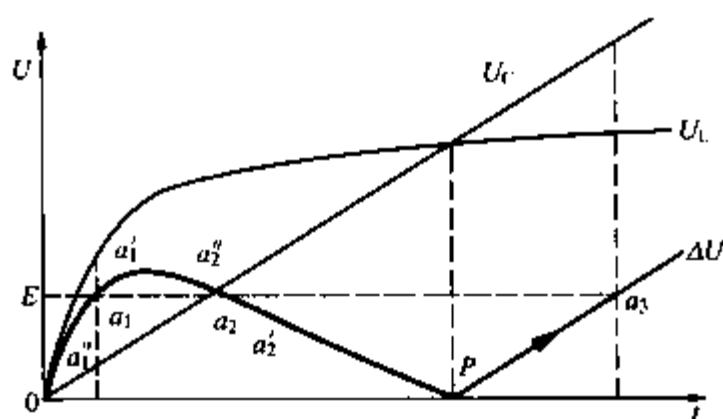


图 9-21 串联铁磁谐振回路的伏安特性

现以  $a_2$  点为例进行说明，若扰动使回路中的电流有微小的增加，即从  $a_2$  点偏离到达  $a_2'$  点，此时外加电势  $E$  将大于  $\Delta U$ ，这使得回路电流继续增大，直至达到新的平衡点  $a_3$  为止；反之，若扰动使电流稍有减小，即从  $a_2$  点偏离到达  $a_2''$  点，则此时  $E$  将小于  $\Delta U$ ，使回路电流继续减小，直到新的平衡点  $a_1$  为止。可见平衡点  $a_2$  不能经受任何微小的扰动，是不稳定的。同理，可鉴别点  $a_1$ 、 $a_3$  都是稳定的工作点。

由图 9-21 可知，当电势  $E$  较小时，回路存在着两个可能的工作点  $a_1$ 、 $a_3$ 。在  $a_1$  点工作时， $U_L > U_C$ ，回路呈感性，电感和电容上的电压都不高，回路电流也不大，回路处于非谐振工作状态。工作在  $a_3$  点时， $U_L < U_C$ ，回路呈容性，此时不仅回路电流较大，而且在电感和电容上都会产生较高的过电压，回路处于谐振工作状态。

正常情况下，系统一般工作在  $a_1$  点，当系统遭受强烈的冲击 (如电源突然合闸) 时，会使回路从  $a_1$  点跃变到  $a_3$  点，这时回路电流相位会发生  $180^\circ$  的突然变化 (称此现象为相位反倾现象)，回路电流激增，电感、电容上的电压也大幅提高，即出现了铁磁谐振。可见，为了建立起稳定的谐振点  $a_3$ ，回路必须经过强烈的扰动过程，这种需要经过过渡过程来建立谐振的情况称为铁磁谐振的“激发”，而一旦“激发”起来以后，谐振状态就可以保持很长时间，不会衰减。

根据以上分析，基波的铁磁谐振有以下特点：

(1) 产生串联铁磁谐振的必要条件是电感和电容的伏安特性必须相交，即

$$\omega L > \frac{1}{\omega C}$$

因而，铁磁谐振可以在较大范围内产生。

(2) 对铁磁谐振回路，在同一电源电动势作用下，回路可能有不只一种稳定工作状态。

在外界激发下,回路可能从非谐振工作状态跃变到谐振工作状态,电路从感性变为容性,发生相位反倾,同时产生过电压和过电流。

(3) 非线性电感是产生铁磁谐振的根本原因,但其饱和特性本身又限制了过电压的幅值,此外,回路中的损耗,会使过电压降低,当回路电阻值大到一定数值时,就不会出现强烈的谐振现象。

为了限制和消除铁磁谐振过电压,可以采取以下措施。

(1) 改善电磁式电压互感器的激磁特性,或改用电容式电压互感器。

(2) 在电压互感器开口三角绕组中接入阻尼电阻,或在电压互感器一次绕组的中性点对地接入非线性电阻。

(3) 在某些情况下,可在 10kV 及以下的母线上装设一组三相对地电容器,或用电缆段代替架空线段,以增大对地电容,从参数搭配上避开谐振。

(4) 在特殊情况下,可将系统中性点临时经电阻接地或直接接地,或投入消弧线圈,也可以按事先规定投入某些线路或设备以改变电路参数,消除谐振过电压。

## 小 结

内部过电压根据其产生原因可分为操作过电压和暂时过电压。操作过电压是电力系统中发生振荡型的暂态过程引起的,而暂时过电压是由于参数的特定配合引起的。

操作过电压是决定电力系统绝缘水平的依据之一,有四种常见的典型形式。切空线过电压是由于断路器触头间电弧重燃引起的,其主要限制措施是采用灭弧性能好的断路器;合空线过电压是由于合闸时断路器动静触头间有电位差引起的,其主要限制措施是采用带并联电阻的断路器和性能优良的氧化锌避雷器;切空变过电压是由于断路器截流引起的,其主要限制措施是采用避雷器;间歇电弧接地过电压是由于故障点的电弧时燃时熄引起的,其有效限制措施是采用中性点经消弧线圈接地。

暂时过电压包括工频电压升高和谐振过电压。电力系统的工频电压升高倍数一般不大,但其作用时间长,影响避雷器的特性参数,在绝缘裕度较小的超高压系统中应充分重视。线性谐振过电压的大小取决于回路损耗电阻  $R$ ;铁磁谐振过电压是由于铁心电感饱和引起的。

## 习 题

9-1 试说明断路器并联电阻在切、合空载线路中限制过电压的作用。

9-2 开断一台 220kV、120MVA 的三相变压器,其空载励磁电流  $I_0$  等于额定电流的 2%,高压绕组每相对地电容为 5 000pF,求在  $I_0$  为幅值时截流可能引起的过电压倍数。

9-3 试述消除间歇性电弧接地过电压的途径。

9-4 某 500kV 线路,长度为 250km;电源电动势为  $E=525\text{kV}$ ,电源漏抗为  $X_S=263\Omega$ ,线路每单位长度正序电感和电容分别为  $L=0.9\text{H/m}$ 、 $C=0.0127\text{nF/m}$ 。求线路末端开路时的线末电压。

9-5 铁磁谐振过电压是如何产生的?它与线性谐振过电压有何不同?

## 第十章 电力系统绝缘配合

电力系统的绝缘包括发电厂、变电所中电气设备的绝缘和输电线路的绝缘。它们在运行中除了要长期承受额定工作电压的作用外,有时还要承受系统中出现的波形、幅值及持续时间各异的各种过电压(内部过电压和外部过电压)的作用。一旦绝缘损坏,就会停电造成经济上的损失。二十世纪前半叶,为了满足电力系统运行安全方面的要求,人们将绝缘应足以耐受运行中可能出现的最大过电压作为确定设备绝缘水平的依据。但是随着系统规模的扩大,电力系统电压等级不断提高,这种做法的不合理性逐渐显示出来,一味地提高输变电设备的绝缘水平不仅技术上越来越困难,而且使设备的绝缘部分占总投资的比重越来越大,经济上也越来越不划算。在一定的条件下,满足一个可以接受的绝缘故障率的前提时,降低绝缘水平可能具有显著的经济效益。因此综合考虑技术、经济、安全运行等方面的要求,合理地确定绝缘水平显得尤为重要,这就是绝缘配合问题。

### 第一节 绝缘配合的原则

绝缘配合就是综合考虑电气设备在系统中可能承受的各种作用电压(工作电压及过电压)、限制过电压的措施和设备绝缘对各种作用电压的耐受特性,合理地确定设备必要的绝缘水平,以使设备的造价、维护费用和设备绝缘故障引起的事故损失达到在经济上和安全运行上总体效益最高的目的。这就要求在技术上处理好各种电压、各种限压措施和设备绝缘耐受能力三者之间的相互配合关系,在经济上协调好设备投资费、运行维护费和事故损失费(可靠性)三者之间的关系。合理的绝缘配合会在经济上和安全运行上达到最高的总体效益,不会因绝缘水平取得过高使设备尺寸过大,造价太高,造成不必要的浪费;也不会因绝缘水平取得过低,虽然节省了设备造价,但使设备在运行中的事故率增加,导致停电损失和维护费用增大,最终不仅造成经济上更大的浪费,而且造成供电可靠性的下降。

绝缘配合的最终目的就是确定电气设备的绝缘水平。所谓某一级电压电气设备的绝缘水平,就是指该设备绝缘可以承受的试验电压标准,在试验电压作用下,设备不应发生闪络或击穿。

电力设备的绝缘水平是由系统最高运行电压、雷电过电压、操作过电压三因素中最严重的一个来决定的。不同电压等级的系统中,各种作用电压的影响不同,绝缘配合的原则、绝缘试验电压的类型也有相应的差别。在220kV及以下系统中,要把雷电过电压限制到低于操作过电压的数值是不经济的,因此在这些系统中,一般以雷电过电压决定设备的绝缘水平,而限制雷电过电压的主要措施是避雷器,则以避雷器的雷电冲击保护水平(残压)来确定设备的绝缘水平,并保证输电线路具有一定的耐雷水平。此确定的绝缘水平在正常情况下能耐受操作过电压的作用,因此一般不采用专门的限制内部过电压的措施。在超高压系统中,操作过电压的幅值随电压等级而提高,在现有的防雷措施下,雷电过电压一般不如操作过电压的危险性大,因此在这些系统中,绝缘水平主要是由操作过电压的大小来决定,一般

需采用专门的限制内部过电压的措施，如并联电抗器、带有并联电阻的断路器及金属氧化物避雷器等。由于限制过电压的措施和要求不同，绝缘配合的做法也不相同。我国对超高压系统中内部过电压的保护原则主要是通过改进断路器的性能，将操作过电压限制到预定的水平，然后以避雷器作为操作过电压的后备保护，因此实际上，超高压系统中电气设备绝缘水平也是以雷电过电压下避雷器的保护特性为基础确定的。

在污秽地区，电力系统外绝缘强度受污秽影响而大大降低，污闪事故常在恶劣气象条件和工作电压下发生。因此，严重污秽地区电力系统外绝缘水平主要由系统最高运行电压所决定。

电力系统绝缘配合是不考虑谐振过电压的，因此在系统设计和运行中要避免谐振过电压的发生。

输电线路绝缘与变电所电气设备绝缘之间不存在配合问题。通常，为保证线路的安全运行，线路绝缘水平远高于变电所电气设备的绝缘水平。虽然多数过电压发源于线路，但高幅值的过电压波传入变电所时，将被变电所母线上的避雷器所限制，而所内电气设备的绝缘水平是以避雷器的保护水平为基础确定的，所以线路过电压波不会威胁所内电气设备的绝缘。

考虑到不同时期的电网结构不同，过电压水平不同，以及发生事故造成的后果不同，对绝缘水平的确定也存在一定的差异。对同一电压等级，不同类型设备、不同地点，允许选择不同的绝缘水平，一般在电网建设初期选用较高的绝缘水平，发展到中、后期，可选用较低的绝缘水平。为了适应这种需要，国际电工委员会（IEC）和我国国家标准对同一电压等级的设备，对应有几个绝缘水平以供选择。

## 第二节 绝缘配合的基本方法

电力系统绝缘配合的方法有惯用法、统计法与简化统计法。

### 一、惯用法

惯用法是长期以来被广泛采用的方法，是根据作用于绝缘上的最大过电压和最小绝缘强度的概念来配合的，即首先确定设备上可能出现的最危险的过电压，然后根据经验乘上一个考虑各种影响因素和具有一定裕度的配合系数，从而决定绝缘应耐受的电压水平。设备绝缘的抗电强度不能低于此耐受电压。但由于实际的过电压值和绝缘强度都是随机变量，很难按照一个严格的规则去估计他们的上下限，为安全运行，采取留有较大裕度的办法解决。因此，惯用法确定的绝缘水平是偏严格的。

确定电气设备绝缘水平的基础是避雷器的保护水平（雷电冲击保护水平和操作冲击保护水平），因而需将设备的绝缘水平与避雷器的保护水平进行配合。雷电或操作冲击电压对绝缘的作用，在某种程度上可以用工频耐压试验来等价。工频耐压试验电压值是按图 10 - 1 所示的程序来确定的。

图 10 - 1 中  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为雷电冲击和操作冲击电压换算成等值工频电压的冲击系数。可见，工频耐压值在某种程度上代表了绝缘对雷电、操作过电压的耐受水平。凡是通

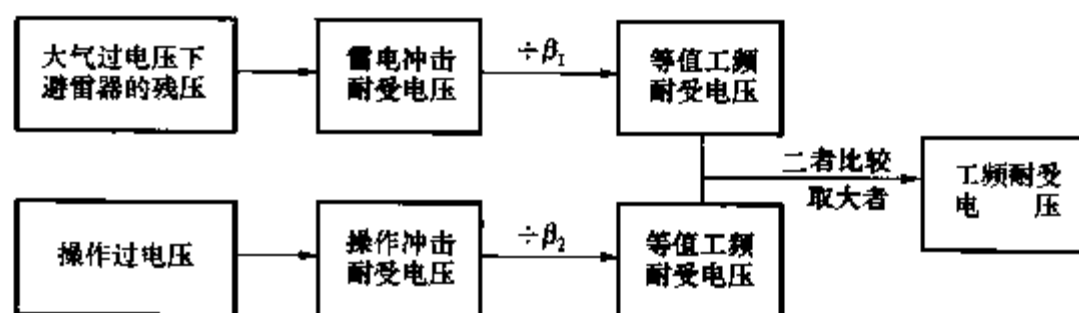


图 10 - 1 确定工频耐受电压的程序

过了工频耐压试验的设备就认为该设备在运行中能保证一定的可靠性。由于工频耐压试验简便易行，220kV 及以下设备的出厂试验应逐个进行工频耐压试验。而对超高压电气设备而言，出厂试验只有在条件不具备时，才允许用工频耐压试验代替。

随着系统额定电压的提高，对 330kV 及以上系统，降低绝缘水平的经济效益越来越显著。若仍按上述惯用法将超高压、特高压系统的绝缘水平定得很高，或要求保护装置、保护措施有超常的性能，则在经济上要付出很大的代价，是不合理的。因而，在 20 世纪 70 年代形成了一种新的绝缘配合方法——统计法。

二、统计法

统计法是根据过电压幅值和绝缘的耐电强度都是随机变量的实际情况，在已知过电压幅值和绝缘闪络电压的概率分布后，用计算的方法求出绝缘闪络的概率和线路的跳闸率，在技术经济比较的基础上，正确的选择绝缘水平。这种方法不只定量地给出设计的安全程度，并能按照使设备费、每年的运行费以及每年的事故损失费的总和为最小的原则，确定一个输电系统的最佳绝缘设计方案。

设  $f(u)$  为过电压幅值的概率密度函数， $p(u)$  为绝缘击穿（或闪络）概率分布函数，且  $f(u)$  与  $p(u)$  互不相关，如图 10 - 2 所示。 $f(U_0)du$  为过电压在  $U_0$  附近  $du$  范围内出现的概率， $p(U_0)$  为过电压  $U_0$  作用下绝缘击穿（或闪络）的概率，这二者是相互独立的。因此，出现这样高的过电压并损坏绝缘的概率为  $p(U_0)f(U_0)du$ ，即图 10 - 2 中阴影部分  $du$  区内的面积。

习惯上，过电压是按绝对值统计的（不分正、负极性，约各占一半），并根据过电压的含义，应有  $u > U_{\text{w}}$ （最大运行相电压幅值），所以过电压的范围是  $U_{\text{w}} \sim \infty$ （或到某一最大值），故绝缘故障率  $A$  为

$$A = \int_{U_{\text{w}}}^{\infty} p(u)f(u)du$$

(10 - 1)

显然， $A$  是图 10 - 2 中阴影部分的总面积。

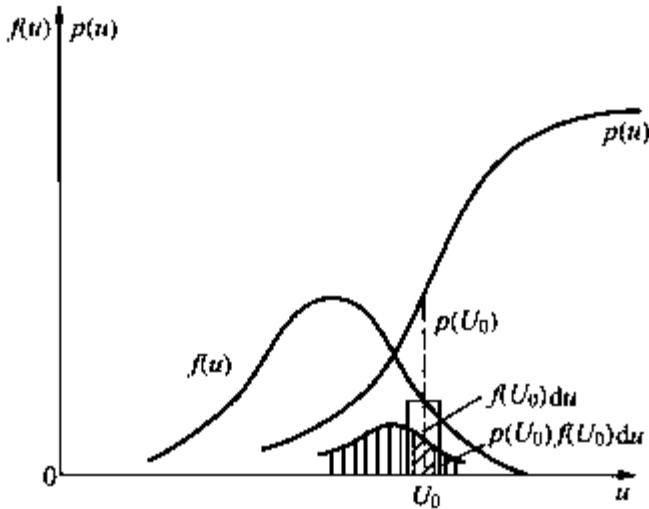


图 10 - 2 绝缘故障率的估算

从图 10 - 2 中可以看到，提高绝缘强度，即曲线  $p(u)$  向右方移动，阴影部分面积减小，绝缘故障率将减小，但设备投资增大；若降低绝缘强度，曲线  $p(u)$  向左移动，阴影部分面积增大，故障率增大，设备维护及事故损失费增大，当然，相应地设备投资费减小。因此，可用统计法按需要对敏感因素作调整，进行一系列试验设计与故障率的估算，根据技术经济的比较，在绝缘成本和故障率之间进行协调，在满足预定故障率的前提下，选择合理的绝缘水平。

利用统计法进行绝缘配合时，绝缘裕度不是选定的某个固定数，而是一个与绝缘故障率相联系的变数。实际工程中严格采用统计法的主要困难在于随机因素较多，而且各种统计数据的概率分布有时并非已知，因而实际上采用得更多的是对某些概率进行一些假定后的简化统计法。

三、简化统计法

简化统计法是设定实际过电压的绝缘放电概率为正态分布规律，并已知其标准偏差。在

此设定基础上,上述两条概率分布曲线就可分别用某一参考概率相对应的点来表示,此两点对应的值分别称为统计过电压和统计耐受电压。国际电工委员会绝缘配合标准推荐采用出现概率为2%过电压(即等于和大于此过电压的出现概率为2%)作为统计过电压 $U_s$ ,推荐采用闪络概率为10%,即耐受概率为90%的电压作为绝缘统计耐受电压 $U_w$ 。于是,绝缘故障率就与这两个值有关,通过计算可得故障率 $A$ ,再根据技术经济比较,定出能接受的 $A$ 值,选择相应的绝缘水平。

实际上,绝缘故障率 $A$ 只决定于 $U_w$ 与 $U_s$ 之间的裕度,因此称它们的比值 $K_s = \frac{U_w}{U_s}$ 为统计安全系数。在过电压保持不变的条件下,提高绝缘水平,其 $U_w$ 值增大, $K_s$ 值也增大,故障率 $A$ 会相应减小。

从形式上看,简化统计法中统计安全系数与惯用法很相似,但惯用法没有引入参数的统计概念,不去估算绝缘故障率。或者说,惯用法是要求绝缘故障率很小,甚至可忽略不计,这是与统计法不同的。

目前,除了330kV及以上的自恢复绝缘(输电线路)采用统计法外,对各电压等级的非自恢复绝缘和降低绝缘的经济效益不显著的220kV及以下自恢复绝缘,仍一直采用惯用法。

### 第三节 电气设备绝缘水平的确定

电气设备包括电机、变压器、电抗器、断路器、互感器等,这些设备的绝缘可分为内绝缘和外绝缘两部分。内绝缘是指密封在箱体内的部分,它们与大气隔离,其耐受电压值基本上与大气条件无关。外绝缘是指暴露于空气中的绝缘,包括空气中的间隙和绝缘表面,其耐受电压与大气条件有很大的关系。

确定电气设备的绝缘水平就是确定设备绝缘的耐受电压试验值,包括额定短时工频耐受电压,即1min工频试验电压;额定雷电冲击耐受电压,用全波雷电冲击电压进行试验,称为全波基本冲击绝缘水平(BIL);额定操作冲击耐受电压,用规定波形(250/2500 $\mu$ s)操作冲击电压进行试验,称为基本操作冲击绝缘水平(SIL)。

针对作用于绝缘的典型过电压种类、幅值、防护措施以及绝缘的耐压试验项目、绝缘裕度等方面的差异,在进行电力系统绝缘配合时,按系统最高运行电压 $U_m$ 值划分为两个范围:

范围Ⅰ  $3.5\text{kV} \leq U_m \leq 252\text{kV}$ ;

范围Ⅱ  $U_m > 252\text{kV}$ 。

即范围Ⅰ是系统标称电压为3~220kV的低、中、高压系统,范围Ⅱ是330kV、500kV的超高压(EHV)系统。

在范围Ⅰ的系统中,避雷器只是限制雷电过电压,在操作过电压作用时是不希望避雷器动作的,即要求正常绝缘能承受操作过电压。通常,除了型式试验要进行雷电冲击和操作冲击试验外,一般只做短时工频耐受电压。这是因为在某一程度上,操作或雷电冲击电压对绝缘的作用可用工频电压等效,且使试验工作方便易行。所以短时工频耐受电压代表绝缘对操作过电压、雷电过电压总的耐受水平。

短时(1min)工频耐压试验所采用的试验电压值往往比电气设备额定相电压高出数倍,其确定过程如图10-1所示。对220kV及以下设备的型式试验,在条件许可时,应由避雷

器的残压  $U_c$  乘以一定的雷电冲击配合系数  $K_1$  后, 选定为雷电冲击耐压值, 做雷电冲击耐受电压试验。对超高压设备, 除工频和雷电冲击耐受电压试验外, 型式试验时还要做操作冲击耐受电压试验, 其值可取统计操作过电压水平或避雷器 (它能同时限制操作过电压) 的操作冲击残压乘以操作冲击配合系数  $K_s$ 。配合系数是一个综合系数, 主要考虑避雷器与被保护设备之间的距离、避雷器内部电感、避雷器运行中参数变化、设备绝缘老化 (累积效应)、变压器工频励磁等因素的影响。

额定雷电冲击耐受电压 (BIL) 可由下式求得

$$BIL = K_1 U_{Pl} \quad (10-2)$$

其中,  $U_{Pl}$  为标称雷电流下的避雷器残压;  $K_1$  为雷电冲击配合系数, 国际电工委员会 (IEC) 规定  $K_1 \geq 1.2$ , 我国规定在电气设备与避雷器相距很近时取 1.25, 相距较远时取 1.4。

额定操作冲击耐受电压 (SIL) 可由下式求得

$$SIL = K_s K_0 U_{xg} \quad (10-3)$$

其中,  $U_{xg}$  为系统最高相电压幅值;  $K_s$  为操作冲击配合系数,  $K_s = 1.15 \sim 1.25$ ;  $K_0$  为计算用操作过电压倍数, 我国相对地操作过电压的计算倍数 (以电网最高运行相电压幅值为基数) 为: 66kV 及以下取 4.0; 110kV、220kV 取 3.0; 330kV 取 2.75; 500kV 取 2.0。

对于范围 II 电力系统 (EHV), 避雷器将同时用于限制雷电与操作过电压, 这时计算最大操作过电压幅值取决于避雷器操作冲击残压  $U_{Ps}$  值。于是有

$$SIL = K_s U_{Ps} \quad (10-4)$$

对范围 II 电气设备, 由于操作冲击波对绝缘作用的特殊性, 以及不能肯定操作冲击电压与工频电压之间的等价程度, 故特规定其操作冲击耐受电压, 而不能用工频耐受电压替代。

为统一规范, BIL 和 SIL 值应从下列标准值中取, 不宜使用中间值。标准值为 325、450、550、650、750、850、950、1050、1175、1300、1425、1550、1675、1800、1950、2100、2250、2400、2550、2700kV。

#### 第四节 架空输电线路绝缘水平的确定

架空输电线路的绝缘水平, 一般不需要考虑与变电站的绝缘配合, 通常是以保证一定的耐雷水平为前提, 在污秽地区或操作过电压被限制到较低数值的情况下, 线路绝缘水平主要由最大工作电压决定。

输电线路的绝缘是指线路绝缘子串的绝缘子片数及线路导线对杆塔、构架的空气距离 (空气间隙)。

##### 一、绝缘子片数的确定

在根据杆塔的机械负荷和环境条件选定绝缘子型式之后, 需要确定每串绝缘子的片数, 绝缘子片数的选择应满足: 在工作电压下不发生雾闪 (污闪), 在操作过电压下不发生雨闪, 并具有一定的雷电冲击耐受强度, 确保线路有一定的耐雷水平。

具体选择程序是: 按工作电压所要求的单位爬电距离决定绝缘子片数, 再按操作过电压的要求计算应有的片数, 取两种要求所得片数中的较大者; 最后校验该线路的耐雷水平与雷击跳闸率是否符合规定要求。

## 1. 按工作电压要求

设单片绝缘子的几何爬电距离为  $L_0$  (cm), 则绝缘子串的单位爬电距离  $\lambda$  (即爬电比距) 为

$$\lambda = \frac{nK_c L_0}{U_m} \quad (\text{cm/kV}) \quad (10-5)$$

式中,  $n$  为每串绝缘子的片数;  $U_m$  为系统最高工作线电压有效值 (kV);  $K_c$  为绝缘子爬电距离有效系数, 主要由各种绝缘子几何泄漏距离对提高污闪电压的有效性来确定, 并以 XP-70 (或 X-4.5) 型和 XP-160 型普通绝缘子为基准, 即它们的  $K_c = 1$ , 其他型号绝缘子的  $K_c$  值由试验确定或查阅相关资料获得。

由长期运行经验知, 在不同污秽地区的线路, 当其  $\lambda$  值大于某值时, 不会引起严重的污闪事故, 可基本满足线路运行可靠性的要求。我国按外绝缘污秽程度不同, 将污秽划分为 5 个等级, 见表 1-1。对应于各污秽等级所要求的最小爬电比距  $\lambda$  值, 如表 1-2 所示, 于是, 可得为避免污秽闪络而需的绝缘子片数  $n_1$  应为

$$n_1 \geq \frac{\lambda U_m}{K_c L_0} \quad (10-6)$$

由于上式是线路运行经验的总结, 其中已包括零值绝缘子 (串中已丧失绝缘性能的绝缘子), 所以不必再增加零值片数。上式对中性点接地方式不同的电网都适用。

## 2. 按操作过电压要求

绝缘子除应在长期工作电压下不发生闪络外, 还应耐受操作过电压的作用, 即绝缘子串的湿闪电压在考虑大气状态等影响因素并保持一定裕度的前提下, 应大于可能出现的操作过电压, 并留有 10% 的裕度。此时, 应有的绝缘子片数为  $n'_2$ , 则由  $n'_2$  片组成的绝缘子串的操作 (或工频) 湿闪电压幅值应为

$$U_{sh} = 1.1 K_0 U_{xg} \quad (10-7)$$

其中,  $K_0$  为操作过电压计算倍数 (见本章第三节);  $U_{xg}$  为系统最高运行相电压幅值; 1.1 为综合考虑各种影响因素和必要裕度的一个综合修正系数。

在没有完整的绝缘子串操作波湿闪电压数据时, 只能近似地用绝缘子串工频湿闪电压代替。对常用的 XP-70 (或 X-4.5) 型  $n'_2$  片绝缘子串的工频湿闪电压幅值  $U_{sh}$ , 可按下列经验公式求得

$$U_{sh} = 60n'_2 + 14 \quad (\text{kV}) \quad (10-8)$$

由式 (10-7) 与式 (10-8) 联合确定的绝缘子片数  $n'_2$  中, 没有包括零值绝缘子, 但在实际运行中, 不排除零值绝缘子存在的可能性, 因此实际选用时应增加零值绝缘子片数  $n_0$ , 即

$$n_2 = n'_2 + n_0 \quad (10-9)$$

预留的零值绝缘子片数  $n_0$  见表 10-1。

表 10-1 零值绝缘子片数  $n_0$

额定电压/kV	35~220		330~500	
绝缘子串类型	悬垂串	耐张串	悬垂串	耐张串
$n_0$	1	2	2	2

如果已知绝缘子串在正极性操作冲击波下的 50% 放电电压  $U_{50\%(\text{S})}$  与片数的关系, 那么可以用以下方法求得  $n'_2$  和  $n_2$ 。绝缘子串应能承受的  $U_{50\%(\text{S})}$  为

$$U_{50\%(S)} \geq K_S U_S$$

(10 - 10)

式中,  $K_S$  为绝缘子串操作过电压配合系数, 对范围 I ( $U_m \leq 252\text{kV}$ ) 取 1.17, 对范围 II ( $U_m > 252\text{kV}$ ) 取 1.25;  $U_S$  对于范围 I 为计算用最大操作过电压, 即  $K_0 U_{xg}$ , 对于范围 II 为合空载线路、单相重合闸和三相重合闸这三种方式中的过电压最大者。

3. 按雷电过电压要求

一般情况下, 按爬电比距及操作过电压选定的绝缘子片数能满足线路耐雷水平的要求。在特殊高杆塔或高海拔地区, 按雷电过电压要求的绝缘子片数  $n_3$  会大于  $n_1$  和  $n_2$ , 成为确定绝缘子串绝缘子片数的决定因素。表 10 - 2 给出了海拔 1 000m 及以下的非污秽地区不同电压等级线路绝缘子型号为 XP-70 (或 X-4.5) 时绝缘子的片数  $n$ 。

表 10 - 2 各级电压线路悬垂绝缘子串片数

线路额定电压 (kV)	35	66	110	220	330	500
按工作电压下爬电比距要求决定 $n_1$	2	4	7	13	19	28
按内部过电压下湿闪电压决定 $n_2$	3	5	7	12	18	22
按大气过电压下耐雷水平要求决定 $n_3$	3	5	7	13	19	25~28
实际采用值 $n$	3	5	7	13	19	28

当线路所在地因海拔高度 ( $>1\,000\text{m}$ ) 引起气象条件变化而异于标准状态时, 应查相关规定进行校正。

线路耐张杆绝缘子的片数要比直线杆多一片。发电厂、变电所内的绝缘子串, 因其重要性较大, 每串的绝缘子片数可按线路耐张杆选取。

二、空气间隙的确定

输电线路的绝缘水平还取决于线路上各种空气间隙的极间距离。从经济角度看, 空气间隙的选择对降低线路建设费用有很大作用。

架空输电线路的空气间隙主要有导线对大地、导线对导线、导线对架空地线以及导线对杆塔及横担。导线对地面的高度主要是考虑穿越导线下的最高物体与导线间的安全距离, 在超高压输电线下还应考虑对地面物体的静电感应问题。导线间的距离主要由导线弧垂最低点在风力作用下, 发生异步摇摆时能耐受工作电压的最小间隙来确定, 由于这种情况出现的机会极少, 所以在低电压等级时以不碰线为原则。导线对地线间的间隙, 由雷击避雷线档距中间不引起对导线的空气间隙击穿的条件来确定。因此, 以下重点介绍如何根据工作电压、内部过电压、大气过电压来确定导线对杆塔的距离。

导线对杆塔空气间隙承受的电压就幅值而言, 是工作电压最低, 内部过电压次之, 雷电过电压幅值最高; 就作用时间而言, 顺序恰好相反。如图 10 - 3 所示, 在确定导线对杆塔间隙的大小时, 必须考虑风吹导线使绝缘子串倾偏摇摆偏向杆塔的偏角。由于工作电压长时间作用在导线上, 应按 20 年一遇的最大风速 (约 25~35m/s) 考虑风力, 相应的绝缘子串风偏角  $\theta_1$  最大; 内部过电压持续的时间较短, 按最大风速的 50% 计算, 相应的风偏角  $\theta_2$  较小;

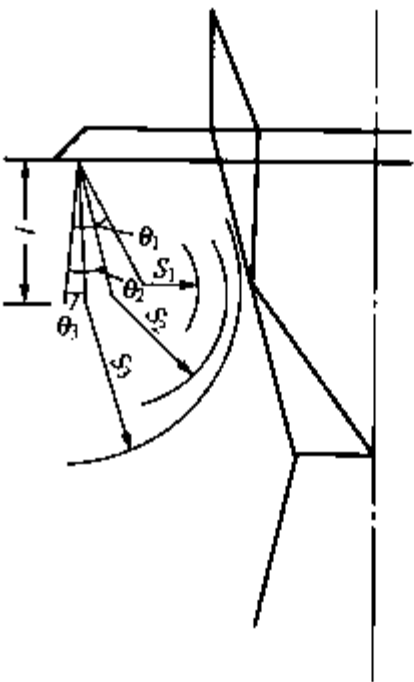


图 10 - 3 绝缘子串风偏角  $\theta$  及其对杆塔的距离  $S$  示意图

雷电过电压持续的时间最短,通常取风速为 10~15m/s 计算风偏角  $\theta_3$ ,  $\theta_3$  是最小的。

1. 按工作电压确定风偏后的间隙  $S_1$

与风偏角  $\theta_1$  所对应的间隙距离  $S_1$  应保证在工作电压作用下不发生闪络,即  $S_1$  的 50% 工频放电电压  $U_{50\%(g)}$  为

$$U_{50\%(g)} \geq K_1 U_{xg} \quad (10-11)$$

其中,  $K_1$  为安全系数,它考虑了气象条件、工频电压升高、安全裕度等因素的影响,可查表 10-3 确定。

表 10-3 安全系数  $K_1$  取值范围

电压等级 (kV)	66 及以下	110~220	330~500
安全系数 $K_1$	1.2	1.35	1.4

2. 按操作过电压确定风偏后的间隙  $S_2$

与风偏角  $\theta_2$  对应的间距  $S_2$  应保证在操作过电压下不发生闪络,其等值工频放电电压  $U_{50\%(s)}$  为

$$U_{50\%(s)} \geq K_2 U_s = K_2 K_0 U_{xg} \quad (10-12)$$

其中,  $K_2$  为线路空气间隙操作过电压统计配合系数(对范围 I 取 1.03,对范围 II 取 1.1),  $U_s$  为配合计算用最大操作过电压;  $K_0$  为操作过电压计算倍数。

3. 按雷电过电压确定风偏后的间隙  $S_3$

与风偏角  $\theta_3$  对应的间距  $S_3$ ,其雷电冲击波作用下的 50% 放电电压值  $U_{50\%(D)}$  通常取为绝缘子串的雷电冲击 50% 放电电压值的 85%。这是为了减少绝缘子串的闪络概率,以免损坏绝缘子沿面绝缘。

当确定了  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  后,即可求得绝缘子串处于垂直位置时对杆塔的水平距离

$$\left. \begin{aligned} L_g &= S_1 + l \sin \theta_1 \\ L_s &= S_2 + l \sin \theta_2 \\ L_l &= S_3 + l \sin \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (10-13)$$

其中  $l$  为绝缘子串的长度。导线对杆塔的最小空气间隙距离选式 (10-13) 中最大的。

在实际中,需考虑杆塔尺寸误差、横担变形和拉线施工误差等不利因素,杆塔与导线间的空气间隙在最小间距的基础上应增加一定的裕度。

各级电压线路的  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  值见表 10-4 所示。

表 10-4 各级电压线路绝缘子串每串最少片数和最小空气间隙距离 (cm)

额定电压 (kV)	35	66	110	220	330	500
XP 型绝缘子片数	3	5	7	13	19 (17)	28 (35)
工作电压要求的 $S_1$ 值	10	20	25	55	90	130
操作过电压要求的 $S_2$ 值	25	50	70	145	195	270
雷电过电压要求的 $S_3$ 值	45	65	100	190	260 (230)	370 (330)

注 1. 表内数值适用于海拔 1000m 及以下地区的线路直线杆悬垂绝缘子串;

2. 330kV、500kV 括号内为 XP3 型绝缘子所对应的值。

由表 10-4 和运行经验表明,一般情况下,空气间距是由雷电过电压决定的。当线路所在地区海拔高度超过 1000m 时,应按有关规定进行校正,适当增大间距。对于发电厂、变电所,在计算最小空气间隙距离时应增加 10% 的裕度。

## 小 结

绝缘配合就是要协调配合好过电压、限压措施与电气设备绝缘水平三者之间的关系,在技术、经济和运行上都能接受。

电力设备的绝缘水平是由系统最高运行电压、雷电过电压、操作过电压三因素中最严重的一个来决定的。

电力系统绝缘配合的方法有惯用法、统计法与简化统计法,惯用法是应用最广泛的绝缘配合方法。

确定电气设备的绝缘水平就是确定设备绝缘的耐受电压试验值。

## 习 题

10 - 1 什么是电力系统的绝缘配合? 其原则是什么?

10 - 2 什么是电气设备的绝缘水平? 220kV 及以下系统中电气设备的绝缘水平主要由哪种过电压决定?

10 - 3 如何确定输电线路绝缘子串中绝缘子的片数?

10 - 4 变电所内电气设备的绝缘水平是否应该与输电线路的绝缘水平相配合? 为什么?

附    录

附录一  部分避雷器技术参数

附表 - 1                                FZ 系列避雷器主要技术参数

产  品 型  号	系统额定电压 (有效值, kV)	避雷器 额定电压 (有效值, kV)	工频放电电压 (有效值, kV)		冲击放电电压 预放电时间 1.5~20 $\mu$ s (峰值, kV) ≧	8/20 $\mu$ s 5kA 冲击电流残 压 (峰值, kV) ≧	电导电流		外形尺寸	
			≦	≧			直流试 验电压 (kV)	电  流 ( $\mu$ A)	外径 (mm)	高度 (mm)
FZ-3	3	3.8	9	11	20	13.5	4	400~600	284	340
FZ-6	6	7.6	16	19	30	27	6			420
FZ-10	10	12.7	26	31	45	45	10			560
FZ-15	(15)	20.5	41	49	73	67	16	400~600	284	645
FZ-20	20	25	51	61	85	81.5	20			787
FZ-30	(30)	25	56	67	110	81.5	24			832
FZ-35	35	41	82	98	134	134	400~600	284		1 554
FZ-44	(44)	50	102	122	163	163				1 838
FZ-66	(66)	75	153	183	244	244				2 627
FZ-110J	110	100	224	268	326	326	400~600		855	3 594
FZ-220J	220	200	448	536	620	652				7 120

注  1. 型号中 F—阀型避雷器, Z—电站用, J—中性点接地系统;  
2. 系统额定电压中有括号者为“元件”;  
3. 避雷器额定电压即避雷器灭弧电压。

附表 - 2                                FCZ 系列避雷器主要技术参数

产  品 型  号	系统额定电压 (有效值, kV)	避雷器 额定电压 (有效值, kV)	工频放电电 压 (有效值, kV)		冲击放电电压 (峰值, kV)		8/20 $\mu$ s 5kA 冲击电流残 压(峰值, kV)≧		元件电导电流		外形尺寸	
			≦	≧	雷电冲击 (1.5~20 $\mu$ s 和 1.5/40 $\mu$ s)	操作冲击 (100~ 1 000 $\mu$ s)	5kA	10kA	直流试 验电压 (kV)	电  流 ( $\mu$ A)	外径 (mm)	高度 (mm)
FCZ3-35	35	41	70	85	112		108	122	50	250~400	432	1 070
FCZ3-110J	110	100	170	195	260		260	285	110	250~400		1 715
FCZ3-220J	220	200	340	390	520		520	570	110	250~400	850	3 068
FCZ1-330J	330	290	510	580	780	820	780	820	160	500~700	1 500	4 220
FCZ-500J	500	440	640	790	1 100	1 080		1 100	160	1 000~1 400	1 850	6 035

注  型号中 C—磁吹型。

附表 - 3 Y5WZ 型电站用无间隙氧化锌避雷器主要技术参数

型 号		避雷器额定电压 (有效值, kV)	系统额定电压 (有效值, kV)	持续运行电压 (有效值, kV)	标称电流下最大残压 (kV)		通流容量		
					陡波	雷电波	8/20 $\mu$ s 波	200 $\mu$ s 方波	4/10 $\mu$ s 波
Y5WZ-3.8	FYZ-3	3.8	3	2	15.5	13.5	5kA	150A	40kA
Y5WZ-7.6	FYZ-6	7.6	6	4	31.0	27.0			
Y5WZ-12.7	FYZ-10	12.7	10	6.6	51.0	45			
Y5WZ-41	FYZ-35	41	35	23.4	154	134			

注 本避雷器适用于和真空断路器配套防止操作过电压和大气过电压对各种变压器的危害。

附表 - 4 Y10W5 型变电所用无间隙氧化锌避雷器主要技术参数

型 号	系 统 额 定 电 压 (有效值, kV)	避 雷 器 额 定 电 压 (有效值, kV)	持 续 运 行 电 压 (有效值, kV)	工 频 参 考 电 压 (峰值, kV)	8/20 $\mu$ s 最大雷电 冲击残压 (峰值, kV)			30/60 $\mu$ s 24kA 最大操作 冲击残压 (峰值, kV)	1/5 $\mu$ s10kA 最大陡度 冲击残压 (峰值, kV)	外绝缘耐受电压			宽 度 (mm)
					5kA	10kA	20kA			工 频 干、 湿 (有效值, kV)	1.2/50 $\mu$ s 标准 雷电波 (峰值, kV)	250/ 2500 $\mu$ s 操作 冲击波 (峰值, kV)	
Y10W5-45/135	35	45		54	124	135				100	231		795
Y10W5-100/248	110	100	73	142		248	266		273	206	500		1 375
Y10W5-192/476	220	192		272		476	510	414	524	395	950		
Y10W5-228/565	220	228		323		565	606	491	622	395	950		
Y10W5-300/693	330	300	210	425		693	740	602	755	460	1 050	850	2 936
Y10W5-396/896	500	396	318	560		896	967	788	986	740	1 675	1 175	5 040
Y10W5-420/950		420		594		950	1 026	826	1 045				
Y10W5-444/995		444		628		995	1 075	875	1 095				
Y10W5-468/1058		468		662		1 058	1 143	920	1 165				

附录二 球间隙击穿电压值  
(大气压力 101.3kPa, 气温 20℃)

附表 - 5 一球接地时, 球隙的击穿电压  
(kV, 最大值, 适用于工频交流、负极性直流、负极性冲击电压)

球径(cm) 间隙(cm)	2	5	6.25	10	12.5	15	25	球径(cm) 间隙(cm)	50	75	100	150	200
0.05	2.4							2.0	58	58			
0.10	4.4							2.5			71		
0.15	6.3							4.0	112	112			
0.20	8.2	8.0						5.0			137	137	137
0.30	11.5							6.0	164	164			
0.40	14.8	14.3	14.2					8.0	214	215			
0.50	18.0			16.9	16.7	16.5		10	262	265	266	267	265
0.60	21.0	20.4	20.2					12	308	313			
0.70	23.9							14	352	360			
0.80	26.6	26.3	26.2					15			387	388	389
0.90	29.0							16	392	406			
1.0	31.2	32.0	31.9	31.6	31.5	31.3	31	18	428	450			
1.2	35.1	37.6	37.5					20	461	492	503	508	510
1.4	38.5	43.0	43.0					22	491	532			
1.5	40.0			45.6	45.6	45.6	45	24	520	570			
1.6	(41.4)	48.1	48.4					25			611	626	630
1.8	(44.0)	53.0	53.6					26	545	606			
2.0	(46.2)	57.4	58.2	59.1	59.2	59.2	59	28	570	640			
2.2		61.5	61.3					30	591	670	709	739	745
2.4		65.3	67.4					32	611	702			
2.5		67.2	69.6	72.0	72.0	72.6	72	34	630	731			
3.0		75.4	79.1	84.1	85.2	85.5	86	35			797	846	858
3.5		82.4	87.5	95.2	97.2	98.1		36	647	756			
4.0		(88.4)	94.8	105	109	110	112	38	(663)	785			
4.5		(93.5)	101	115	119	122		40	(679)	806	876	947	965
5.0		(98.0)	(107)	123	129	132	137	45	(710)	858	949	1 040	1 075
5.5			(112)	131	138	143		50	(738)	904	1 010	1 030	1 180
6.0			(116)	138	146	152	161	55		945	1 070	1 210	
6.5				144	154	161		60		(981)	1 120	1 280	1 360
7.0				150	162	169	184	65		(1 012)	1 170	1 350	
7.5				155	168	177		70		(1 040)	1 210	1 420	1 530
8.0				(160)	174	185	205	75		(1 060)	1 240	1 470	
9.0				(169)	186	198	225	80			(1 280)	1 530	1 680
10				(177)	(196)	209	243	90			(1 330)	1 630	1 810
11					(204)	219	260	100			(1 370)	1 710	1 930
12					(212)	(229)	275	110				1 790	2 030
13						(238)	289	120				(1 860)	2 120
14						(245)	302	130				(1 900)	2 200
15						(252)	314	140				(1 950)	2 280
16							325	150				1 980	2 350
18							345	160					2 410
20							(363)	180					2 500
22							(378)	200					2 530
24							(391)						
25							(396)						

注 括号内数字准确度较低。

附表 - 6 一球接地时, 球隙的击穿电压  
(kV, 最大值, 适用于正极性直流、正极性冲击电压)

球径(cm) 间隙(cm)	2	5	6.25	10	12.5	15	25	球径(cm) 间隙(cm)	50	75	100	150	200
0.4		14.3	14.2					2.0	58	58			
0.5				16.9	16.7	16.5		4.0	112	112			
0.6		20.4	20.2					5.0			137	137	137
0.8		26.3	26.2					6.0	164	164			
1.0		32.0	31.9	31.6	31.6	31.3	31	8.0	214	215			
1.2		37.8	37.6					10	252	265	266	267	265
1.4		43.3	43.1					12	310	313			
1.5								14	356	360			
1.6		49.0	49.0					15			388	388	389
1.8		54.4	54.6					16	401	407			
2.0		59.4	60.0	59.1	59.2	59.2	59	18	440	452			
2.2		64.2	65.0					20	478	499	505	509	510
2.4		68.8	69.7					22	511	541			
2.5		71.0	72.3	72.8	72.5	72.6		24	543	582			
3.0		81.1	83.4	85.6	85.7	85.6	86	25			616	626	630
3.5		90.0	93.4	97.4	98.6	98.7		26	572	621			
4.0		(97.5)	103	109	111	111	112	28	600	659			
4.5		(104)	110	120	123	124		30	625	694	719	740	745
5.0		(109)	(117)	130	134	136	138	32	646	727			
5.5			(123)	139	144	147		34	669	759			
6.0			(128)	148	154	158	162	35			816	850	860
6.5				156	163	168		36	687	788			
7.0				163	172	178	187	38	(705)	816			
7.5				170	180	187		40	(721)	841	900	957	967
8.0				(176)	188	196	210	45	(756)	899	979	1 060	1 080
9.0				(186)	202	212	232	50	(785)	949	1 050	1 150	1 180
10				(195)	(214)	226	252	55		994	1 110	1 240	
11					(224)	238	272	60		(1 030)	1 160	1 310	1 380
12					(232)	(249)	290	65		(1 070)	1 210	1 390	
13						260	306	70		(1 100)	1 260	1 460	1 560
14						(269)	321	75		(1 120)	1 300	1 520	
15						(276)	335	80			(1 330)	1 580	1 710
16							348	90			(1 390)	1 680	1 850
18							372	100			(1 490)	1 770	1 980
20							(393)	110				1 850	2 080
22							(410)	120				(1 920)	2 180
24							(424)	130				(1 970)	2 270
25							(430)	140				(2 020)	2 350
								150				(2 060)	2 420
								160					(2 480)
								180					(2 580)
								200					(2 650)

注 括号内数字准确度较低。

附表 - 7

球隙对称分布时, 球隙的击穿电压  
(kV, 最大值, 适用于工频交流、直流、冲击电压)

球径(cm) 间隙(cm)	2	5	6.25	10	12.5	15	25	球径(cm) 间隙(cm)	50	75	100	150	200
0.05	2.4							2.0	58	58			
0.10	4.4							2.5			71		
0.15	6.3							4.0	112	112			
0.20	8.2	8.0						5.0			137	137	137
0.30	11.6							6.0	164	164			
0.40	14.9	14.3	14.2					8.0	214	215			
0.50	18.1			16.9	16.7	16.5		10	263	265	266	267	265
0.60	21.2	20.4	20.2					12	309	314			
0.70	24.1							14	353	362			
0.80	26.9	26.4	26.2					16	394	408			
0.90	29.5							18	434	452			
1.0	32.0	32.2	32.0	31.6	31.5	31.3	31	20	472	495	504	511	511
1.4	41.2	43.3	45.2					22	507	535			
1.5				45.8	45.7	45.5	45	24	542	576			
1.6	(45.2)	48.5	48.6					25			613	628	632
1.8	(48.7)	53.5	53.9					26	575	615			
2.0	(51.8)	58.3	59.0	59.3	59.4	59.2	59	28	607	652			
2.2		62.8	63.9					30	638	689	714	741	747
2.4		67.3	68.6					32		725			
2.5		69.4	70.9	72.4	72.6	72.9	72	34	693	759			
3.0		79.3	81.8	84.6	85.4	85.8	86	35			812	848	860
3.5		88.3	91.8	96.5	97.7	98.4		36	718	793			
4.0		(96.4)	101	107	100	111	113	38	(742)	825			
4.5		(104)	109	118	121	123		40	(767)	856	902	950	972
5.0		(111)	(117)	128	132	134	138	45	(823)	929	986	1 050	1 080
5.5			(124)	137	142	145		50	(874)	997	1 070	1 140	1 180
6.0			(131)	146	152	155	162	55		1 060	1 140	1 230	
6.5				155	161	165		60		(1 120)	1 210	1 320	1 380
7.0				163	170	175	185	65		(1 170)	(1 280)	1 410	
7.5				170	173	185		70		(1 220)	1 340	1 490	1 560
8.0				(177)	187	194	207	75		(1 270)	1 400	1 560	
9.0				(191)	203	221	228	80			(1 460)	1 640	1 730
10				(203)	217	227	248	90			(1 560)	1 760	1 900
11					229	242	267	100			(1 660)	1 910	2 050
12					(241)	(256)	286	110				2 030	2 190
13						(268)	303	120				(2 140)	2 330
14						(280)	320	130				(2 240)	2 460
15						(292)	336	140				(2 330)	2 580
16							(352)	150				(2 420)	2 690
18							(381)	160					(2 800)
20							(407)	180					(3 000)
22							(431)	200					(3 180)
24							(452)						
25							(463)						

注 括号内数字准确度较低。

## 参 考 文 献

1. 关根志主编. 高电压工程基础. 北京: 中国电力出版社, 2002
2. 张一尘主编. 高电压技术. 上海: 上海电力学院成教院, 2001
3. 梁曦东等编著. 高电压工程. 北京: 清华大学出版社, 2003
4. 马乃详编著. 长间隙放电. 北京: 中国电力出版社, 1998
5. 朱德恒、严璋主编. 高电压绝缘. 北京: 清华大学出版社, 1992
6. 张纬钺、何金良、高玉明编著. 过电压防护及绝缘配合. 北京: 清华大学出版社, 1992
7. 周泽存、沈其工、方瑜、王大忠编. 高电压技术. 北京: 中国电力出版社, 2004
8. 赵智大主编. 高电压技术. 北京: 中国电力出版社, 1999
9. 邱毓昌、施围、张文元编. 高电压工程. 西安: 西安交通大学出版社, 1995
10. 宋执诚主编. 高电压技术. 北京: 水利电力出版社, 1995
11. 中国电力行业标准 DL/T620—1997: 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合. 北京: 中国电力出版社, 1997

[ G e n e r a l   I n f o r m a t i o n ]

书名 = 高电压技术

作者 = 张红主编

页数 = 2 1 2

出版社 = 中国电力出版社

出版日期 = 2 0 0 9 . 0 3

S S 号 = 1 2 1 7 5 5 6 4

D X 号 = 0 0 0 0 0 6 6 9 7 0 0 7

简介 = 本书为 2 1 世纪高等学校规划教材。本书介绍了气体放电，液体、固体电介质的电气性能，电气设备的绝缘检测和诊断，高压试验设备及高电压的测量，线路和绕组中的波过程，雷电及防雷保护装置，输电线路的防雷保护，发电厂、变电所的防雷保护，电力系统内部过电压和电力系统绝缘配

封面  
书名  
版权  
前言  
目录

第一章	气体放电
第一节	气体中带电质点的产生与消失
第二节	均匀电场中的放电过程
第三节	不均匀电场中的放电过程
第四节	不同电压形式下空气间隙的击穿特性
第五节	大气条件对空气间隙击穿电压的影响
第六节	提高气隙击穿电压的措施
第七节	沿面放电与污秽放电
第八节	S F 6 气体的绝缘特性
	小结
	习题
第二章	液体、固体电介质的电气性能
第一节	电介质的极化、电导和损耗
第二节	液体电介质的击穿
第三节	固体电介质的击穿
第四节	电介质的老化
第五节	组合绝缘的击穿特性
	小结
	习题
第三章	电气设备绝缘的检测和诊断
第一节	绝缘电阻和吸收比的测量
第二节	直流泄漏电流的测量
第三节	介质损失角正切值的测量
第四节	局部放电的测量
第五节	绝缘油试验
第六节	耐压试验
第七节	绝缘的在线监测
	小结
	习题
第四章	高压试验设备及高电压的测量
第一节	稳态高压试验设备及其测量
第二节	冲击高压试验设备及其测量
	小结
	习题
第五章	线路和绕组中的波过程
第一节	均匀无损单导线线路中的波过程
第二节	波的折射与反射
第三节	波通过串联电感和并联电容
第四节	波的多次折、反射
第五节	无损平行多导线系统中的波过程
第六节	波的衰减与变形
第七节	绕组中的波过程
	小结
	习题
第六章	雷电及防雷保护装置
第一节	雷电放电
第二节	雷电参数
第三节	避雷针和避雷线的保护范围
第四节	避雷器
第五节	接地装置
	小结

	习题
第七章	输电线路的防雷保护
	第一节 输电线路的感应雷过电压
	第二节 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平
	第三节 输电线路的雷击跳闸率
	第四节 输电线路的防雷保护措施
	小结
	习题
第八章	发电厂、变电站的防雷保护
	第一节 直击雷过电压的防护
	第二节 侵入波过电压的防护
	第三节 变电站的进线段保护
	第四节 变压器防雷保护的几个具体问题
	第五节 配电变压器的防雷保护
	第六节 气体绝缘变电站 (GIS) 的过电压保护
	第七节 旋转电机的防雷保护
	小结
	习题
第九章	电力系统内部过电压
	第一节 切除空载线路过电压
	第二节 空载线路合闸过电压
	第三节 切除空载变压器过电压
	第四节 间歇电弧接地过电压
	第五节 工频电压升高
	第六节 谐振过电压
	小结
	习题
第十章	电力系统绝缘配合
	第一节 绝缘配合的原则
	第二节 绝缘配合的基本方法
	第三节 电气设备绝缘水平的确定
	第四节 架空输电线路绝缘水平的确定
	小结
	习题
	附录
附录一	部分避雷器技术参数
附录二	球间隙击穿电压值
参考文献	