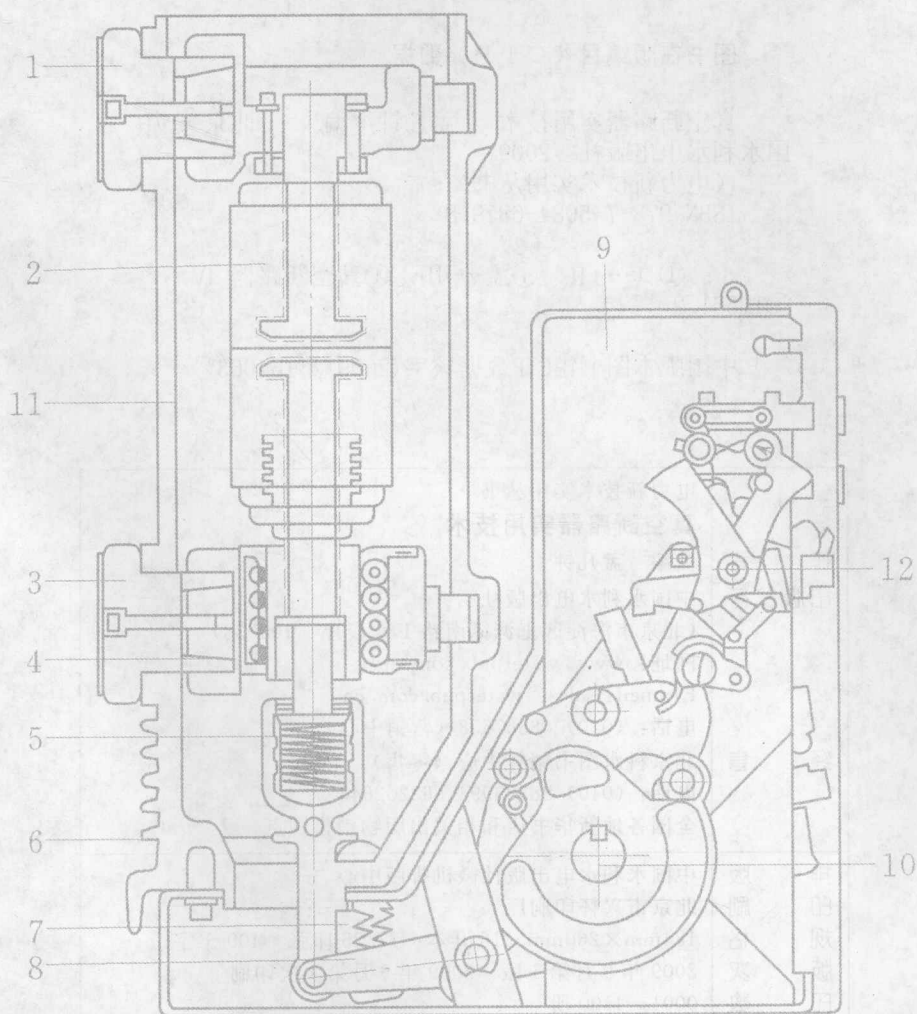


电力新技术实用丛书

真空断路器实用技术

主编 孟凡钟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书编写人员名单

主 编 孟凡钟

副 主 编 陈家斌 马 雁 高小飞 崔军朝 季 宏

景 胜 雷 明 郭宝明 张模成 吴 起

赵 鹏 葛秦岭 康 巍 罗碧华 段志勇

编写人员 张光明 郭 锐 李 楠 杨 巍 周卫民

刘宏伟 宋志勇 张建村 张建乡 杨 光

常 健 王 璞 郭媛媛 郭琳琳 石海霞

闫志刚 周 勇 沈 磊 刘东升 冷 冰

谢 伟 张华伟 季向阳 刘 平 姚明伟

刘东升 许向东 许向伟 臧小萌 程魁杰

陈 钊

前言

PREFACE

真空断路器具有开断能力强，可靠性高，无爆炸危害，体积小，重量轻，寿命长，而且使用方便，对环境无污染，维护简单等一系列优点。受到广大用户的普遍欢迎，得到了广泛的应用。为电力系统的满发多供、安全可靠、稳定运行起到了重要作用。

真空断路器是近年来普及的新产品，它的安装调试基本上是厂家协助进行的，仅靠厂家安装人员指导，或通过产品安装使用说明书的学习，对电力行业职工进行这项新技术的应用掌握，远不能满足岗位的需要，给安装、检修、运行维护和试验人员实际工作带来一些困难。为满足电力职工岗位工作的需要，我们组织一些有实际工作经验又有一定理论水平的专家，编写了《真空断路器实用技术》一书，供广大电力职工及技术人员参考。

本书是依据国家现行标准，电力行业及机械行业有关标准、规程及真空断路器厂家有关技术资料，根据真空断路器的结构性能，结合电力生产一线职工需要掌握的基本技术知识和操作技能进行编写的。在内容上注意理论和实际相结合，以实际应用为出发点和归宿的原则，结合电力企业岗位应知应会的要求，进行选材组稿。在阐述理论基础知识和真空断路器原理性能的同时，着力介绍真空断路器的安装、运行维护、检修、故障检测、诊断方法和技能等内容。

本书内容比较系统、全面、实用。在编写过程中，孟凡钟、陈家斌、马雁、高小飞、崔军朝、季宏、景胜、雷明、郭宝明、张模成、吴起、赵鹏、葛秦岭、康巍、罗碧华、段志勇、张光明、郭锐、李楠、杨巍、周卫民、刘宏伟、宋志勇、张建村等同志参加编写了各章节，有关厂家、电业部门的

目 录

CONTENTS

前言	1
第一章 真空断路器的电介质性能及应用	1
第一节 电器的电介质简介	1
第二节 电器中的电弧	7
第三节 真空基本知识	15
第四节 真空介质的特性	16
第五节 真空中的电弧及灭弧	23
第六节 真空断路器的发展及应用	34
第二章 真空断路器结构组成及特点	43
第一节 真空断路器基本结构组成	43
第二节 真空灭弧室的结构及特点	48
第三节 真空断路器常用操动机构	66
第四节 真空断路器用几种操动机构的介绍	82
第五节 中压真空断路器结构及性能	91
第三章 真空断路器的过电压及防护	102
第一节 过电压产生的原因及危害	102
第二节 过电压的防护措施	117
第四章 真空断路器主要产品技术参数	125
第一节 真空断路器与其它断路器比较及应用环境	125
第二节 真空断路器的型号及技术参数	126
第三节 真空断路器户外主要产品介绍	134
第四节 真空断路器户内主要产品介绍	146
第五节 国外真空断路器部分产品介绍	161
第六节 真空开关柜	165
第五章 真空断路器的安装调试	171
第一节 真空断路器的订货、运输及储存	171

第二节	真空断路器安装前的准备工作	174
第三节	真空断路器的安装工序及要求	176
第四节	真空断路器的安装及调试要求	179
第五节	户外真空断路器的安装调试	183
第六节	户内铠装移开式金属封闭开关柜安装调试	189
第六章	真空断路器的运行维护及故障处理	212
第一节	真空断路器的运行原则	212
第二节	真空断路器的操作	214
第三节	真空断路器的运行维护	216
第四节	真空断路器的常见故障处理	219
第七章	真空断路器的检修	235
第一节	真空断路器的检修技术要求及准备工作	235
第二节	ZN28—10 系列真空断路器的检修	237
第八章	真空断路器的故障检测	244
第一节	真空断路器的劣化和故障机理	244
第二节	真空断路器的故障类型及原因	247
第三节	真空断路器的检查测试	247
第四节	真空断路器的故障检测诊断实例	252
附:	12kV~40.5kV 高压真空断路器订货技术条件	255

第一章 真空断路器的电介质性能及应用

第一节 电器的电介质简介

电介质又称绝缘，有气体、液体和固体三类，是电气设备的重要组成部分，在载流导体之间或导体与大地之间起绝缘作用，有时还兼作导体和铁芯的冷却或灭弧作用。电介质绝缘性能的完好程度是电器安全运行的关键，电器的任何损坏和事故，最终都体现为电介质绝缘性能的变坏或消失（击穿）。因此，研究电介质在电场作用下所发生的物理现象，了解电介质的绝缘性能与其物质微结构之间的联系，掌握电介质的击穿机理及影响其绝缘强度的各种因素，是非常必要的。

电介质在电场作用下，有极化、电导、损耗和击穿四种物理现象发生。

一、电介质极化

电介质的分子结构分为无极分子（中性分子）和极性分子两类。无极分子在正常状态下，分子的正、负电荷的作用中心是重合的，对外不显电性；而极性分子在正常状态时，分子的正、负电荷的作用中心间有一定距离，单个分子的两端对外都呈现出电性，称为偶极分子（简称偶极子），只是由于热运动使分子混乱排列，正、负电性互相抵消，才使电介质整体不显电性。如聚氯乙烯、氯化联苯、橡胶、松香、胶木、纤维等，均属极性分子。电介质分子在外电场中，受电场力作用，使无极分子中相互束缚的电荷发生弹性位移（正电荷沿电场方向，负电荷逆电场方向），而偶极分子则沿电场方向取向排列，使电介质整体出现电性。这种现象称为电介质极化。

极化的种类较多，现扼要介绍几种极化形式。

（一）电子式极化

如图 1-1 (a) 所示为电子式极化，在外电场作用下，电子轨道发生变形位移，其作用中心与原子核的正电荷中心不再重合，对外形成一个电偶极子形态。极化强度（正、负电荷作用中心的相对位移）随外电场的增加而加强。电子位移式极化是弹性极化，当外电

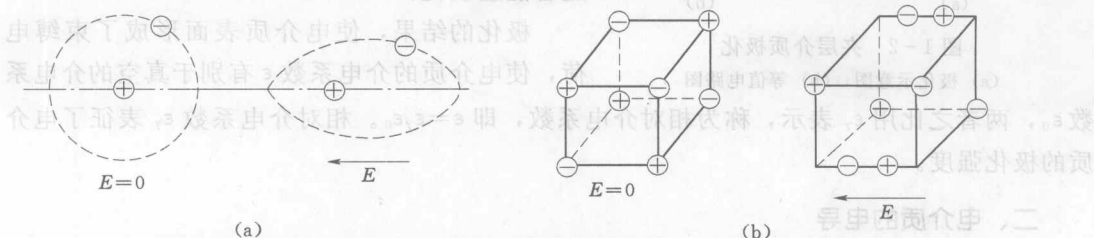


图 1-1 无损极化

(a) 电子位移极化；(b) 离子位移极化



场消失后，正、负电荷间的引力使其自动回复中性状态，没有能量损失。由于电子的质量很小，极化过程的时间短，故电子式极化的程度与频率及加压时间关系不大，受温度的影响也不大。

(二) 离子式极化

对属于离子式结构的无机化合物分子，在外电场作用下，其极化情况如图 1-1 (b) 所示。正、负离子发生弹性位移，正、负电荷中心不再重合，而形成电矩，对外界显示出电的极性来。离子式极化也是弹性极化，当外电场消失后，正、负离子自动回复到原来的晶格位置，呈中性状态，没有能量损失，为无损极化的一种。离子式极化过程很短，极化的程度不随外施电压的频率变化。温度对离子式极化的影响较大，温度升高降低了离子间的结合力，使极化程度增加，使离子密度随温度升高而下降。

(三) 偶极子极化

极性分子的电介质，单个分子均有一个永久性的偶极矩，由于处在不停的热运动中，分子排列混乱，对外不显示极性。在外电场作用下，偶极子受电场力作用而取向有规律排列，整个电介质显示出电的极性来。偶极子极化是非弹性的，偶极子在取向排列过程中消耗能量转变为热能而不能回收。偶极子极化所需的时间较长，因此对电场变化的频率较为敏感，当外加电压频率很高时，偶极子来不及转向，使极化减弱。偶极子极化受温度影响很大，温度升高使分子热运动加剧，妨碍了偶极子取向排列而使极化减弱，而温度较低时，分子间的联系紧密，也会使偶极子转向困难而使极化减弱。所以，在低温时，极化强度先随温度升高而加强，后又随温度继续上升而下降。

(四) 夹层式极化

所谓夹层式极化是指两种不同性质的电介质在电场中的极化现象，如图 1-2 所示。电器的绝缘，多为两种以上的分层绝缘材料的组合，这时绝缘中就出现了不同的分界表面。对于不均匀、含有杂质或受潮的绝缘，也可以等效于这种夹层介质看待。

夹层电介质在外电场作用下的极化，称为夹层介质极化。夹层介质的极化过程非常缓慢，时间由几十秒至几十分钟，甚至更长，同时伴随着能量损耗。

极化的结果，使电介质表面形成了束缚电荷，使电介质的介电系数 ϵ 有别于真空的介电系数 ϵ_0 ，两者之比用 ϵ_r 表示，称为相对介电系数，即 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 。相对介电系数 ϵ_r 表征了电介质的极化强度。

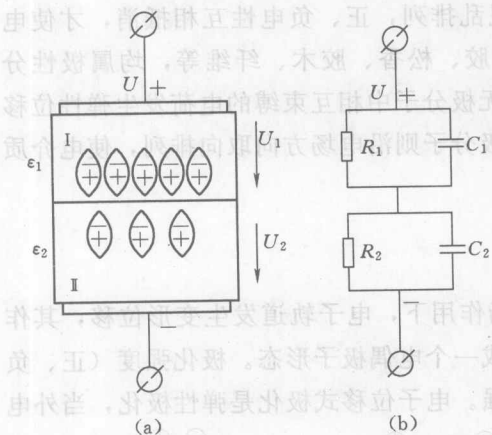


图 1-2 夹层介质极化

(a) 极化示意图；(b) 等值电路图

数 ϵ_0 ，两者之比用 ϵ_r 表示，称为相对介电系数，即 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 。相对介电系数 ϵ_r 表征了电介质的极化强度。

二、电介质的电导

任何电介质都不是不导电的，只是电阻率要比导体大得多（绝缘体的电阻率 ρ 为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ ；导体的 ρ 为 $10^{-6} \sim 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ ；半导体的 ρ 为 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ）。所以，



在直流电压 U 的作用下, 电介质中将有稳定的微量泄漏电流 I (也称为漏导电流) 通过。与泄漏电流所对应的电阻 $R=U/I$ 称为绝缘电阻; 绝缘电阻的倒数 $g=1/R$ 称为电介质电导。电介质的电导与金属导体的电子电导不同, 主要是离子电导, 它包括电介质本身分子中受约束的带电质点和电介质中的杂质在热运动和电场作用下离解成自由离子所形成的电导。电介质电导决定了电介质中的泄漏电流和发热, 是反映电介质绝缘品质的重要参数之一。

电介质电导与温度有密切的关系, 温度愈高、热运动愈强, 参与漏导的被离解的自由离子就愈多, 电导随温度升高而增大, 近似于指数规律。所以, 绝缘电阻具有负的温度系数。

电介质电导与电压有关, 当所加电压接近击穿时, 由于高电场作用从电极拉出电子参与漏导, 使电导显著增加。

对于固体电介质, 绝缘电阻是由体积电阻和表面电阻两部分并联组成, 表面电阻受外界潮湿和脏污的影响很大, 不能用它来说明绝缘内部的问题。因此在电器交接和预防性试验中, 应排除表面泄漏电流的影响。

以上所述的电介质电导或绝缘电阻所决定的电流, 是指加电压稳定后的漏导电流。但是, 在加直流电压瞬间的电流, 要比稳定的漏导电流大得多, 且随时间很快地衰减。

在一定的直流电压作用下, 流过电介质的泄漏电流与绝缘电阻成反比, 测量所得的泄漏电流越小, 反映绝缘电阻越大。

绝缘电阻试验中所测得的电流是通过电介质呈衰减变化的总电流, 而不是稳定的泄漏电流。所测得的绝缘电阻也是逐渐趋向稳定的变化值, 必须等待几何电流和吸收电流衰减后, 只剩下泄漏电流时, 绝缘电阻才能稳定。因此, 测量绝缘电阻时应在加电压足够长时间后, 电流趋于稳定时, 才能得到准确的结果, 一般规定加电压后 1min 读取绝缘电阻值。

在绝缘试验中, 不仅依据稳定时的绝缘电阻值来判断绝缘的优劣, 而且还可以根据吸收现象的变化, 判断绝缘的好坏。当绝缘处于良好和干燥状态时, 泄漏电流较小, 吸收现象明显; 当绝缘受潮时, 由于离子数剧增, 泄漏电流增长得很快, 而电容电流和吸收电流却变化不大, 相比之下, 吸收现象就变得不太明显, 绝缘电阻随时间的变化变得平缓, 如图 1-3 所示。因此, 可以根据电介质的吸收特性判断出绝缘的受潮程度。吸收比就是根据上述原理确定的。在实际试验中, 通常以摇表摇测 60s 时的绝缘电阻值与 15s 时的绝缘电阻值之比, 称为吸收比, 以 K 表示

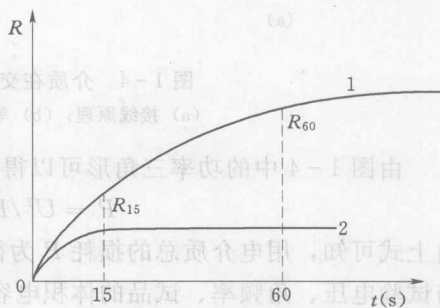


图 1-3 吸收比的测试

1—绝缘良好; 2—有贯通性缺陷或受潮

$K = R_{60}/R_{15}$ 吸收比 K 反映出绝缘的吸收特性, 当绝缘受潮时吸收比下降。电气绝缘的吸收比 K , 不受几何尺寸的影响, 能更好地说明电气的绝缘状态。



三、电介质的损耗

电介质在外电压作用下,有泄漏电流和有损极化的吸收电流存在,而产生功率损耗。电介质的损耗将电能转变为热能,引起内部发热而使温度升高,使泄漏电流增大、有损极化加剧。如果介质损耗超过一定标准,就会使上述循环恶性发展,有可能在绝缘薄弱的地方引起击穿。因此介质损失的大小,也是反映电介质绝缘品质的重要参数之一。

在直流电压作用下,极化过程所引起的损耗仅出现在加电压的瞬间。从稳定的角度来看,只有泄漏电流产生的损耗,其大小可以从绝缘电阻的关系中得到表达,故无须再引入介质损耗这个概念。

在交流电压作用下,除了泄漏电流的损耗外,因有损极化的反复进行,使功率损耗长期发生。很多电介质的这种极化损耗远较其泄漏电流的损耗为大。因此,除了泄漏电流(或绝缘电阻)以外,还需要利用介质损失这个指标来衡量电介质绝缘性能的优劣。

电介质在交流电压作用下,可以用并联的理想电容器和有效电阻所代替,其等值电路和对应的向量图,如图 1-4 所示。流过介质的电流包括有功和无功两个分量,即

$$\dot{I} = I_R + jI_C$$

电源供给的视在功率为

$$S = P + jQ = U(I_R + jI_C) = UI_R + jUI_C$$

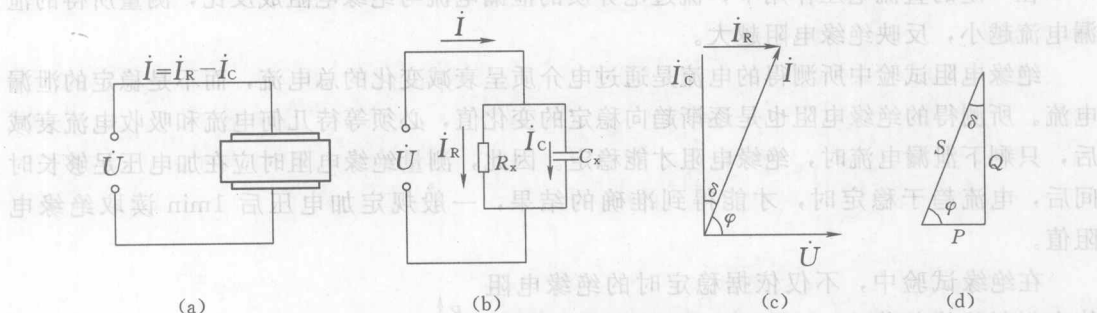


图 1-4 介质在交流电压作用下的等值电路及向量图

(a) 接线原理; (b) 等值电路; (c) 向量图; (d) 功率三角形

由图 1-4 中的功率三角形可以得出电介质中总的有功损耗 P 为

$$P = U^2/R_x = Q \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta$$

由上式可知,用电介质总的损耗 P 为衡量其绝缘品质是不科学的,因为电介质的总损耗 P 与试验电压、角频率、试品的体积电容(即几何尺寸)等多种因素有关,不同几何尺寸的试品难以互相进行比较。因此,常以电介质的“ $\operatorname{tg} \delta$ ”取代总损耗 P 来反映电介质的绝缘品质。

用 $\operatorname{tg} \delta$ 表征电介质损耗方面的品质,称为介质损失角正切值(俗称介质损耗或介损角)。对于均匀电介质, $\operatorname{tg} \delta$ 是一项反映电介质损耗率的参数,与绝缘的几何尺寸、体积大小无关。通过测量 $\operatorname{tg} \delta$,可以反映出整个绝缘的分布性缺陷,如运行中设备绝缘的普遍受潮和老化,这时流过绝缘的有功电流分量将增大, $\operatorname{tg} \delta$ 也增大。因此,可以通过测定 $\operatorname{tg} \delta$ 来判断绝缘的优劣。

测量 $\text{tg}\delta$ 测定值的因素主要有频率、温度和电压。

频率对 $\text{tg}\delta$ 的影响很大，并且与电介质的性质有关。随着频率的增大，电介质中偶极子反复转向的速度加快，损耗也就随之增大。当频率高过某一数值时，偶极子的惯性及相互间的摩擦使其跟不上频率的变化时，损耗反而下降。

温度对 $\text{tg}\delta$ 的影响，随着电介质结构的不同差异很大。中性和弱极性电介质的损耗，主要来自电导，极化损耗并不明显，所以 $\text{tg}\delta$ 随温度升高而增大。而极性电介质的温度特性如图 1-5 所示，在温度较低时，电导和偶极子极化损耗均随温度升高而增加，但当温度超过 t_1 后，电导损耗虽然仍随温度上升而增加，但由于分子热运动加剧阻碍了偶极式极化的进行，极化损耗减少并超过了电导损耗的增加，使总的 $\text{tg}\delta$ 反而随温度上升而下降。到 t_2 以后，电导损耗成为主要因素， $\text{tg}\delta$ 又随温度上升而增加。

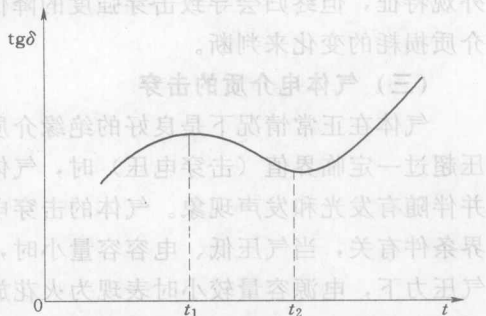


图 1-5 极性介质的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系

在一定的电压范围内， $\text{tg}\delta$ 不随电压变化，只有当电压上升到介质的起始游离电压以上时，电介质中夹杂的汽泡或杂质开始游离，产生了附加的游离损耗， $\text{tg}\delta$ 才会急剧增加。因此，可以通过在较高电压下测定 $\text{tg}\delta$ ，以检查绝缘中夹杂的气隙或老化分层等缺陷。

由于试验所测得的 $\text{tg}\delta$ 值是整个试品的平均值，对于绝缘内部的集中性缺陷（如局部小体积受潮或渗入汽泡、杂质等）反应就不灵敏，虽然对于存在缺陷的局部，介质损失及其对应的 $\text{tg}\delta$ 值将明显地增大，但由于这部分的体积小，所能引起的整个绝缘总体积中介质损失不会出现明显增加，因此，所测得的 $\text{tg}\delta$ 的平均值就不会有显著的变化。所以，介损试验难于发现大型设备或多元件组合型电器中存在的集中性缺陷。对于多元件组合型电器进行总体测量所得的 $\text{tg}\delta$ 值，往往在最大值与最小值之间，当分析判断困难时，就必须进行解体测试。

四、电介质老化和击穿

（一）电介质的击穿强度

耐受电压能力，是一切电介质（包括气体、液体、固体）的最基本性能。当施加于电介质的电压达到某一临界值时，通过电介质的电流就会急剧增加，以致电介质突然丧失其绝缘性能而发生放电，这种现象称为击穿。电介质被击穿时电极间所加的最低电压 U_i 称为击穿电压。击穿电压随介质厚度（气体和液体则称为间隙的距离）而不同，不能作为衡量电介质耐压能力的参量，而同一条件下电介质击穿时的电场强度 E_i 则是相同的，可以用来作为额定电介质绝缘性能的标准，称为击穿电场强度（即击穿强度）或抗电强度。在均匀电场中，电介质的击穿强度为击穿电压 u_i 与介质厚度（或间隙距高） d 之比。

（二）电介质老化

电介质在使用过程中，长期处在电场作用下，并承受热、应力、氧化和化学腐蚀等多种因素的作用，其内部结构和外观都在缓慢地发生不可逆转的变化，使其绝缘性能和其它



物理性能逐渐变坏,以致最后丧失其绝缘能力,电介质的这种现象称之为老化。

电介质老化不仅外观变色、变形、变脆(有的变软,有的变硬)或表面龟裂、剥落、起泡等,其理化性能和机械强度、电导率、介电系数和介质损耗等电气性能,均会有不同程度的降低或变坏。一种电介质的老化过程,可能只有其中一些性能指标变坏和出现某些外观特征,但终归会导致击穿强度的降低。电介质老化程度可以通过电导率或绝缘电阻及介质损耗的变化来判断。

(三) 气体电介质的击穿

气体在正常情况下是良好的绝缘介质,在电气设备得到广泛应用。当气体的电极间电压超过一定临界值(击穿电压)时,气体的电导就突然增大,失去绝缘性能而导致放电,并伴随有发光和发声现象。气体的击穿电压又叫气体放电电压。气体的放电形式有:与外界条件有关,当气压低、电容容量小时,放电表现为充满整个间隙的辉光放电形式;在大气压力下,电源容量较小时表现为火花放电,电源容量足够大时发展为电弧放电形式;极不均匀电场中,在整个间隙被击穿之前,在电极曲率半径很大的尖端局部强电场中,会出现暗蓝色的放电微光,并发现声音的放电形式,称为电晕放电。

气体间隙之所以会击穿形成放电通道,是由于在强电场作用下产生了强烈的游离过程,并发展为自持放电的结果。冲击电压是作用时间以微秒计算的短暂电压,雷电过电压和操作过电压都属于冲击电压的范畴。冲击电压对高压电器的绝缘有很大的威胁,必须加以防范。

气体间隙冲击击穿电压高于直流或工频交流击穿电压。这是因为整个间隙击穿放电的发展过程,不仅需要足够高的作用电压,还需要一定的作用时间。

冲击放电的放电电压,由于受放射线照射等偶然因素的影响而具有分散性。即间隙多次施加同一电压试验时,有时能击穿,有时不能击穿。随着试验电压幅值的提高,间隙击穿的百分比也提高。为了表征间隙耐受冲击电压的绝缘能力,工程上以多次加同一电压进行试验,其击穿的概率为50%时,该冲击电压的幅值作为间隙的击穿电压,称为50%冲击放电电压,它与间隙的最低放电电压已相差不远。

在冲击电压作用下,击穿电压不仅与距离有关,而且与放电发展的时间有关,50%冲击放电电压已不能完全说明间隙的击穿特性,因此必须用伏秒特性曲线来表示间隙在冲击

电压下的击穿特性。

伏秒特性曲线是间隙在同一波形不同幅值的冲击电压作用下,击穿电压与放电时间的关系曲线,当间隙的冲击电压波的尾部被击穿时,击穿电压仍以冲击电压的幅值计,如图1-6所示。冲击放电的伏秒特性由试验得出。

(四) 提高气体间隙放电电压的措施

提高气体间隙耐电强度的途径,归结为改善电场分布、降低最高场强和增加游离难度两方面。

1. 改变电极形状、改善电场分布、降低最高场强
电场分布愈均匀,平均击穿电场强度就愈高。

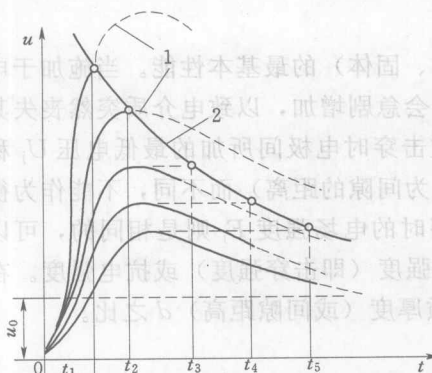


图1-6 间隙伏秒特性

1—冲击电压; 2—伏秒特性



因此可以采用有利的绝缘结构,如增大电极的曲率半径、电极上加金属罩和均压环、消除电极上的棱角、毛刺和尽量使电极表面光滑等。

2. 利用空间电荷对电场的畸变作用

(1) 细线的采用。高压试验室常用细线作工频高压的引线,使细线周围形成较均匀的电晕层,而且当电压增高,电晕层也逐渐扩大,这时电晕放电形成的空间电荷相当于增大了导线的直径,从而改善了电场分布,提高了击穿强度。

(2) 屏障的采用。在电场极不均匀的空气间隙中,放入固体的电介质薄层作为屏障,将空间电荷阻止在屏障的一侧,使空间电荷与另一电极间形成较均匀的电场,使整个间隙的击穿电压得到提高。

3. 采用高气压

提高气体间隙中压力,增加气体密度,降低电子在两次碰撞间的加速行程,增加碰撞游离的难度而提高击穿强度。

4. 采用高真空

在高真空中空气极为稀薄,大大减少了电子碰撞的机会,提高了碰撞游离的难度,而提高了击穿电压。

5. 采用高耐电强度气体

近年来使用的高耐电强度气体为六氟化硫(SF_6)。由于 SF_6 具有极强的负电性,容易俘获自由电子为负离子,不仅削弱了电子碰撞游离的能力,同时还加强了复合过程;此外, SF_6 气体的分子量和分子直径远大于空气分子,电子在其中加速的自由行程短,不易积累能量,这样就增加了碰撞游离的难度,所以具有很高的击穿强度。

第二节 电器中的电弧

当断路器分开电路的电流时,触头(断口)之间就会产生电弧,电路中的电流越大,形成的电弧越强。如果不能及时将电弧熄灭,不仅无法切断电路,还可能烧毁断路器,甚至发生爆炸,造成事故。

电弧是气体游离放电现象。电弧的能量集中,温度很高,弧柱温度可达到 10000°C 以上,而维持电弧稳定燃烧的电压却很低。由于电弧是一束游离的气体,容易在气(液)流的吹或电动力的作用下迅速移动、拉长或变形。

一、电器中电弧的产生与熄灭

(一) 电弧的产生

1. 电弧产生的条件

当开关切断电路时,触头分离的过程中,由于动、静触头间的接触压力和接触面积不断下降和减少,接触电阻迅速增大,使触头急剧发热,温度升高。在触头分开的瞬间,触头间立即充满了不导电的介质(如空气),电流不能通过,即电路在一瞬间被切断。但这时由于触头的温度高,金属触头内的一部分自由电子,因具有较大的动能而从触头表面逸出,称为“热电子发射”;同时由于触头开始分断的瞬间距离小,触头间电场强度很高



(间隙距离为 10^{-5} cm 时, 电场强度可高达 $10^5 \sim 10^6$ V/cm), 在强大电场力的作用下, 将阴极触头内的一部分电子从阴极表面拉出, 称“强电场发射”。使触头之间的介质中出现了自由电子, 自由电子在电场力的作用下, 逐渐加速运动, 迅速向阳极运行。自由电子在向阳极高速运动的过程中, 沿途不断与气体的分子发生碰撞, 如果运动中的自由电子积累了足够大的动能, 碰撞会使中性的气体分子游离成正离子、负离子(中性分子俘获自由电子)和自由电子。新产生的自由电子和原有的自由电子一起在电场中加速运动, 又与其它的中性分子相碰撞, 再次发生碰撞游离, 形成电子崩并发展为流柱, 使原本绝缘的气体间隙, 存在着大量导电的自由电子正、负离子而导电。在电压的作用下, 强大的电流从流柱中通过, 由于电源容量很大, 使大量的电能转变为热能, 温度急剧升高, 形成了高热、耀眼的电弧。

电弧电流的密度大 (10000 A/cm^2 以上)、温度高, 弧柱温度可高达 $5000 \sim 13000^\circ\text{C}$ 。弧柱中的高温气体分子, 本身具有极高的动能而作剧烈的热运动, 在无规则的热运动中相互碰撞而游离, 称为“热游离”, 弧柱中导电的正、负离子和自由电子, 就是靠热游离来维持的。由于电弧放电主要靠热游离来维持, 因此, 维持稳定电弧的电压不需要很高。

2. 电弧形成过程

电弧的形成是在很短的时间内发生的连续过程。最初, 阴极由于热电子发射和强电场发射提供起始的自由电子, 接着由于碰撞游离——电子崩一流柱而导致介质击穿, 产生电弧, 最后靠热游离来维持电弧。

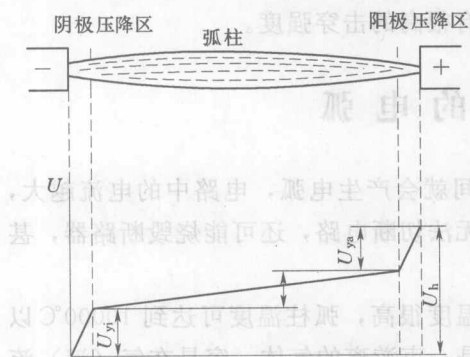


图 1-7 沿电弧的电压分布

电弧的维持靠电弧本身的热游离, 电弧愈强, 温度愈高, 电弧愈稳定。当开关触头分断电路时产生电弧, 其强弱除与电路的电压有关外, 还决定于被切断电流的大小, 电路中的电流大, 表明电路中的阻抗低, 介质击穿后形成的电弧电流也就大, 而电弧稳定不易熄灭。

3. 电弧的组成

电弧形成之后, 维持电弧稳定燃烧的电压称为电弧电压。试验表明: 电弧电压沿整个弧长不是均匀分布, 而是分为阴极压降区、弧柱和阳极压降区三部分, 如图 1-7 所示。阴极压降区虽然

只占弧长的很小一部分, 但电压却很高; 阳极压降区的电压, 一般小于阴极压降区的电压, 且随电弧电流的增大而减少, 甚至接近于零; 弧柱虽占电弧全长的大部分, 而电压的变化却不大。

(二) 电弧的熄灭

1. 维持电弧的条件。中性气体分子的游离, 是产生电弧和维持电弧的必要条件。然而在游离的同时, 也存在着带电质点(正离子与负离子或自由电子)相互中和为不带电的中性质点的现象。这种游离的反过程, 称为“去游离”。在电弧燃烧过程中, 游离和去游离过程同时存在。当游



离作用大于去游离作用时，弧柱内离子增加，电弧电流增大；若两者作用平衡，则电弧稳定燃烧；若去游离大于游离作用时，则电弧电流减少，直至熄灭。因此，电弧熄灭的基本条件是：使电弧的去游离作用大于游离作用。要使电弧迅速熄灭，就必须加强去游离的条件。

2. 灭弧方法 电弧的去游离方式有复合和扩散两种。

(1) 复合是两个带异号电荷的质点相聚在一起，使异号电荷中和的现象，其条件是带异号电荷的质点在一定的时间内必须处于相近的距离。由于电子运动速度很快（约为离子速度的 10000 倍），与正离子复合的机会就少得多，若让电弧与固体介质表面接触，使电子首先附着在固体介质表面上，成为负离子，就很容易吸引正离子进行复合了。拉长和冷却电弧，降低带电质点的热运动速度，都有助于复合的加强。

(2) 扩散是带电质点从弧柱中逸出现象。扩散是由于电弧与周围介质存在着很大的温度差和浓度差的结果。不断用较冷又未游离的气体吹动电弧或将电弧在周围介质中移动，不仅仅电弧加速冷却，还会增大电弧与介质间的温差和离子浓度差，使扩散增加。拉长电弧，增大电弧长度与截面的比值，扩散也会加强。

二、直流电弧的特性及灭弧条件

(一) 直流电弧的特性

电弧放电靠热游离来维持，电弧中的电导决定于弧道中带电粒子的多少，因此与电弧电流有关。电弧电流增大，热游离加剧，带电粒子数增多，使电弧电阻与电流平方成反比下降。当直流电弧稳定燃烧时，实测的电弧电压随电弧电流变化的关系，是一条下降的曲线，如图 1-8 所示，称为电弧的静态伏-安特性曲线。伏-安特性是电弧的主要特性，它表明了电弧电流 i_h 和电弧电压 u_h 之间相互对应和制约的关系。

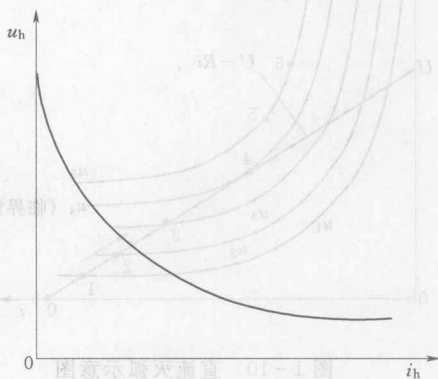


图 1-8 直流电弧的伏-安特性

同时，在直流电路中，加在开关触头上的电压又受到电阻压降和电感电压的制约。在电路中，开关触头和负载电阻、电感相串联，如图 1-9 所示。电源电压 U 为电阻压降 $u_R = Ri$ 、电感压降 $u_L = L \frac{di}{dt}$ 和触头电压 u_c 之和。即

$$U = u_R + u_L + u_c$$

当电弧稳定燃烧时， $di/dt = 0$ ， $U = u_R + u_c$ ，触头电压 u_c 为

$$u_c = U - Ri$$

为一条直线，称为触头电压曲线，它表明电源施加在触头上的电压与电源电压、负载电阻和电路电流（即电弧电流）间的关系。

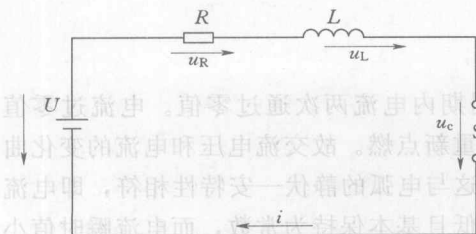


图 1-9 直流电路的断开



（二）直流电弧的灭弧条件

从上述直流电弧的特性分析可见，当触头电压 u_c 与伏—安特性对应的电弧电压 u_h 相等时，电弧才能稳定的燃烧，即

$$u_c = u_h = U - Ri \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为稳定燃烧的电弧方程。因此，可以得出直流电弧燃烧的条件是：加在开关触头上的电压 ($U - Ri$) 必须满足电弧的伏—安特性，也就是两条曲线必须相交。同时也就得出了直流电弧的灭弧条件

$u_h > u_c = U - Ri$ 即触头电压曲线与伏—安特性曲线不相交。

当触头电压曲线与伏—安特性曲线相割时，即触头电压大于该电弧电流下的电弧电压时，电弧电流增加，到满足稳定燃烧的电弧方程时为止，电弧在两条曲线的下交点稳定燃烧。

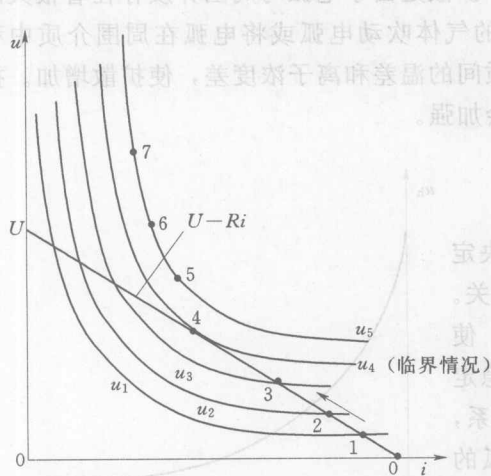


图 1-10 直流灭弧示意图

电弧的伏—安特性曲线，随触头的开距、去游离的强弱（开关灭弧性能）而变化，当开距增大和吹弧作用增强时，使弧长为 $l_1 < l_2 < l_3 < l_4 < l_5$ 时，对应的电弧静态伏特性曲线为 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 、 u_5 ，相应电弧稳定燃烧点为 1、2、3、4，电弧电压不断增加，电弧电流不断减少，到工作点达到临界状态后电弧熄灭，如图 1-10 所示。

从上述分析可以看出，灭弧性能取决于触头电压曲线和伏—安特性曲线的高低：触头电压曲线越向上抬（电源电压高或负载电阻小，也就是负载电流大），灭弧就越困难；而抬高伏—安特性曲线（拉长电弧或加强去游离）可促使电弧熄灭。

电路中的电感 L ，在电弧燃烧时，起着延缓电流变化速度的作用 ($u_h > u_c$ 时，电流减少， di/dt 为负，自感电势阻止电流下降；而当 $u_h < u_c$ 时， di/dt 为正，自感电势阻止电流上升)，而在电弧熄灭时，电流降低为零，自感电势会加到电源电压上，产生操作过电压，开关灭弧性能愈强，电流变化愈大，过电压愈高。因此，断开直流的电器，不宜采用灭弧能力特别强的灭弧装置。

三、交流电弧的特性及灭弧条件

（一）交流电弧的特性

交流电压和电流随时间作周期性变化，每一周期内电流两次通过零值。电流过零值时，电弧自动熄灭，而后随着电压的升高，电弧又重新点燃。故交流电压和电流的变化曲线，如图 1-11 所示。电弧电压的波形成马鞍形，这与电弧的静伏—安特性相符，即电流瞬时值高时，电弧温度高、直径大，所以电弧电压低且基本保持为常数，而电流瞬时值小时，电弧温度低、直径小，这时电弧电压则高。对于每半周而言，前半部电弧电压略高于

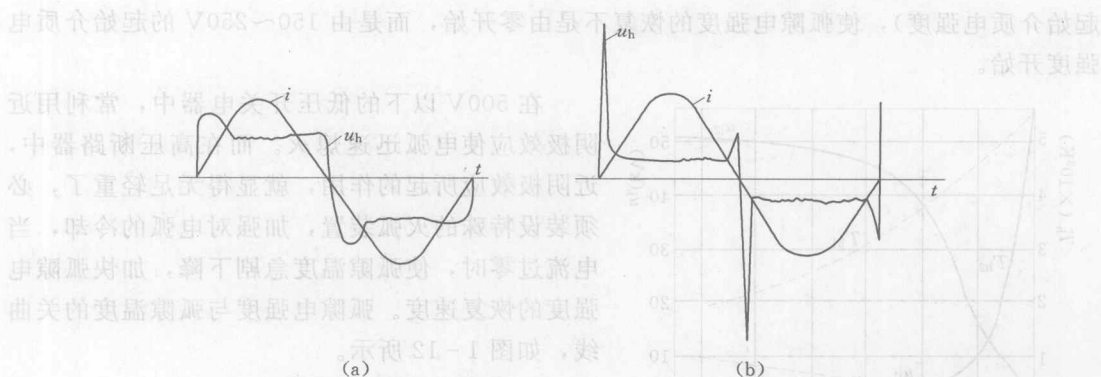


图 1-11 交流电弧电压和电流的变化曲线

(a) 冷却; (b) 加强冷却

后半部电压, 这是由于后半部温度略高于前半部所致。加强冷却使每半波中有更高的燃弧尖峰和熄弧尖峰, 如图 1-11 (b) 所示。

交流电弧每半周电流过零一次, 电流过零时, 电弧将自动熄灭, 但弧道中的等离子体并不能随电流而消失, 到下半周电压增高后电弧又重燃。因此, 对交流电弧来说, 不是电弧能否熄灭, 而是电弧过零后弧隙是否会再击穿而重燃的问题。只有电弧过零后不再重燃, 电弧才能熄灭。

(二) 交流电弧的灭弧条件

决定交流电弧是否重燃的两个因素是: 电压的恢复速度和弧隙介质电强度 (使弧隙不被击穿重燃电弧的临界电压, 简称介质电强度) 的恢复速度。

1. 弧隙介质电强度的恢复过程

在电流过零后, 弧隙介质电强度的恢复过程是相当复杂的过程。弧隙介质电强度的恢复, 有热击穿和电击穿两个方面。

热击穿方面, 在开断大电流时, 电弧电流过零后, 弧隙的介质温度仍然很高, 往往会超过金属蒸气开始热游离的温度。在此情况下, 弧隙仍有一定的电导存在, 当恢复电压加在弧隙上时, 就会有一小电流从弧隙中流过, 称为弧后电流。此时, 弧隙进行着发热和散热两个过程, 若发热大于散热, 则弧隙温度不断上升, 最后导致热击穿; 若散热大于发热, 弧隙温度继续下降, 失去了热击穿的可能。当弧隙温度降低到 $3000 \sim 4000\text{K}$ 以下, 热游离基本停止。若电流过零时弧隙温度较低, 但电击穿复燃的可能性仍然存在。电击穿复燃机理与气体介质击穿相似。对于电击穿而言, 提高弧隙介质电强度的措施与提高气体间隙耐压强度一致, 即与介质的种类、状态 (包括压力、温度、流动情况) 和电极的材料、形状、表面状况等有关。

促使弧隙介质电强度恢复的因素中, 还有近阴极效应。所谓近阴极效应, 是当电流过零极性改变时, 弧隙中剩余带电粒子的运动方向也随之要改变, 由于电子比正离子的质量小得多, 所以在弧隙极性改变时, 电子能迅速地向相反方向运动, 而正离子却几乎不动, 这样在阴极附近形成了只有正电荷的不导电的薄层, 阻碍阴极发射电子, 使阴极附近的电强度几乎立即 (几分之一微秒) 恢复到 $150 \sim 250\text{V}$ (其值与电极的材料和状况有关, 称为