

第 1 章 概 述

1.1 绝缘子和输变电设备外绝缘

电能的出现和广泛应用彻底改变了人类的生产和生活状态,试想,如果没有电,当今世界将是什么景象。在对 20 世纪人类最伟大发明的评选中,电力系统独占鳌头,此评选结果客观地反映了电能对促进生产力发展和提升人类文明做出的突出贡献。

电力系统由电能的产生、电能的输送和电能的使用等三部分组成。电能的产生主要是利用煤、油、天然气、水力、核能等一次能源,通过发电机实现向电能的转换。利用太阳能、风能、生物质能、地热、潮汐等洁净能源的发电技术近年来获得快速发展;利用核聚变产生的能量发电是人类努力的方向,由于技术难度太大至今尚未取得突破性进展;目前世界各国主要是利用火电厂、水电站、核电站发电。发电厂和电力负荷中心往往距离较远,可能相距上千公里。为了减少输电过程中电能的损失,必须采用高电压技术输送电力,电力输送的距离越远,输送的容量越大,所需的输电电压等级就越高。我国输电线路采用的电压等级有:110 kV,220 kV,330 kV 和 500 kV,750 kV 输变电系统已开始在我国西北地区建设。110 kV 以上称高压,500 kV 以上称超高压,1000 kV 以上称特高压,前苏联和日本已建成特高压输电线路。在发电厂端有升压变电站将电压升高,在负荷端有降压变电站将电压降低,再经过 35 kV 或 10 kV 配电线路将电能送到用户,在用户端通过变压器将电压进一步降低到 380/220 V,供用户直接使用。以上介绍的是交流输、配、变电系统。超高压直流输电有输送容量大、损耗小、稳定性好等优点,因此在长距离、大容量输电领域占有重要地位,我国已建成数条 ± 500 kV 超高压直流输电线路。我国建设 ± 800 kV 特高压直流输电和 1000 kV 特高压交流输电工程的问题也已提上议事日程。

本书不研究发电和配电问题,主要研究输变电系统的外绝缘问题,重点是绝缘子。

电能的输送主要通过架空输电线路,随着世界经济的高速发展,城市化进程加快,城市里高楼林立,输电线路的线路走廊越来越拥挤,再加上城市景观的要求,在城区内电能的输送,逐步由空中转为地下,通过电缆输送。电缆的价格比架空线路

要高得多,二者的价格比通常高达十倍,因此今后相当长时间内,电能的输送仍主要靠架空输电线路,电缆的应用主要限于城区,城市以外地区仍将是架空输电线路占主导地位。

绝缘子是架空输电线路的重要组成部分。传输电能的导线处于高电位。杆塔处于地电位,绝缘子的作用一方面使导线和杆塔在电气上绝缘,另一方面使导线和杆塔在机械上相连,绝缘子要承受导线自重及导线的风载、覆冰等各种机械力的作用。这些作用力通过绝缘子传递给杆塔,杆塔还要承受绝缘子自身的重力。绝缘子要同时满足电气性能和机械性能两方面的要求。

变电站的电气设备如变压器、断路器、电压互感器、电流互感器、避雷器、隔离刀闸等设备都有瓷套、棒形支柱等部件,这些部件也同时起着电气绝缘和机械支撑的作用,大型瓷套同时起着容器的作用,内部装着电器组件和绝缘油。这些瓷套和棒形支柱等器件也统称为绝缘子。

在电气性能方面,绝缘子除了承受长期工作电压的作用外,还要承受暂态的操作过电压和雷电过电压的作用,要求绝缘子应能承受这些电压的作用,不发生绝缘击穿,不发生沿面闪络,更不能造成损坏。在机械性能方面,要求绝缘子在长期的机械载荷作用下能稳定可靠地工作,同时要求对飓风和地震也要有较好的承受能力。对绝缘子除了电气性能和机械性能方面的要求外,还要求绝缘子有较好的耐候性能和抗老化能力。要求绝缘子能抵御雨雪冰霜、风吹日晒、酷暑严寒,在各种恶劣气象条件下都能稳定可靠地工作,并且应有几十年的使用寿命。

对绝缘子上述多方面性能的要求,构成了输变电设备外绝缘问题的主要研究内容。

1.2 有关名词术语

本节列出了与绝缘子和输变电设备外绝缘有关的名词术语,对这些术语的确切定义主要参照《中国电力百科全书》及 *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*。

绝缘子 一般由固体绝缘材料制成,安装在不同电位的导体之间或导体与接地构件之间,是同时起到电气绝缘和机械支撑作用的器件。不同类型绝缘子的结构、外形虽有较大差异,但都是由绝缘本体和连接金具两大部分组成的。

外绝缘 指空气间隙绝缘和暴露在大气中的绝缘子表面的绝缘。外绝缘的耐受电压值与大气条件密切相关。气隙击穿和沿面闪络是外绝缘丧失绝缘性能的表现形式,一般说来,击穿或闪络发生后,空气的绝缘性能可自动恢复,属自恢复性绝缘。

内绝缘 指不与大气直接接触的绝缘,其耐受电压值与大气条件无关。内绝缘可由固体、液体、气体或多种介质的组合构成,内绝缘一旦击穿往往是不能自动恢复的,属非自恢复性绝缘。

自恢复性绝缘 在外加电压的作用下绝缘破坏后,绝缘性能可自动恢复到以前的水平,此类绝缘称自恢复性绝缘。一般说来外绝缘属于自恢复性绝缘,但也有例外。

非自恢复性绝缘 在外加电压的作用下绝缘击穿后,绝缘性能丧失或者不能完全恢复到以前的绝缘水平,此类绝缘称非自恢复性绝缘。一般说来内绝缘属于非自恢复性绝缘,但也有例外。

击穿 固体介质内部发生的破坏性放电,通常会造成介质绝缘性能的永久性损伤。

闪络 在外加电压的作用下,发生在不同电位的两电极之间,沿着固体介质和大气交界面所发生的放电现象。在闪络通道上可发生足够强的电离以产生电弧。

基本雷电冲击绝缘水平 在特定条件下对自恢复绝缘施加标准雷电冲击波,所得到具有 90% 耐受概率(10% 放电概率)的标准雷电波的幅值。

基本操作冲击绝缘水平 在特定条件下对自恢复绝缘施加标准操作冲击波,所得到具有 90% 耐受概率(10% 放电概率)的标准操作波的幅值。

干弧距离 在两个端部电极之间通过中间介质的最短放电距离,或者是最短的通过若干中间电极的放电距离(见图 1.1)。

连接长度 导体和支撑结构之间的直线距离,包括绝缘距离和两端连接金具的长度(见图 1.1)。

泄漏距离 在导电部件之间沿着绝缘表面测出的最短距离之和(见图 1.1)。

被保护泄漏距离 不直接承受阳光、风、雨等自然因素作用的绝缘表面的泄漏距离。对悬式电瓷和玻璃绝缘子而言,被保护泄漏距离是指绝缘子下表面沿棱槽的泄漏距离。

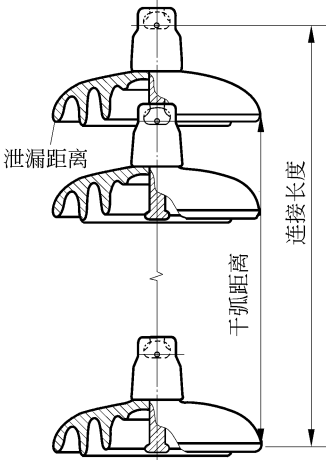


图 1.1 绝缘子各种距离(长度)示意图

1.3 绝缘子的种类和用途

用于架空线路的绝缘子称做线路绝缘子,在电站用于支持母线或隔离刀闸的绝缘子称做电站支柱绝缘子。套管的作用是使电器设备内部的带电端子和外部系统相连或者是使室内的带电端子和室外系统相连。瓷套类电站绝缘子的作用是作为电压互感器、电流互感器或避雷器等设备的容器及绝缘护套。绝缘子的另一个

种类是电缆端头,通过它将电缆和架空线路相连。

根据用途的不同,线路绝缘子又可细分为几种不同的类型。在杆塔上用于悬挂架空导线的线路绝缘子称做悬式绝缘子。在线路的始、末端,线路转弯处以及其他部位,需承受导线张力的绝缘子称做耐张绝缘子。悬式绝缘子和耐张绝缘子都是固定在与塔柱相连的塔臂上,它们的结构和形状可能一样,差别仅是悬挂方式和作用的不同。悬式绝缘子是垂直悬挂或 V 形悬挂,耐张绝缘子是水平悬挂,对耐张绝缘子的机械强度要求较高,往往采用多串并联的方式。在城区为了减少线路走廊,架空线路常采用横担绝缘子,横担绝缘子同时起绝缘和横担的作用。

按采用的绝缘材料划分,绝缘子可分为电瓷、玻璃和复合绝缘子三大类。复合绝缘子又名合成绝缘子,也称为有机绝缘子或非瓷绝缘子。电瓷和玻璃绝缘子由无机材料制作,电瓷绝缘子已有 100 余年的使用历史,玻璃绝缘子的使用历史也有 70 多年,复合绝缘子的历史较短,20 世纪 70 年代才成功用于电力系统外绝缘。

半导体釉绝缘子是一种特殊形式的电瓷绝缘子,它是在普通电瓷绝缘子表面涂一层半导体釉,主要用于污秽地区。

按绝缘子的具体结构划分,可分为线路绝缘子和电站绝缘子两大类。线路绝缘子分为悬式绝缘子、针式绝缘子、横担绝缘子等几类,悬式绝缘子又分为盘形悬式绝缘子和棒形悬式绝缘子。电站绝缘子可分为支柱绝缘子、瓷套和套管等几类。

1.3.1 悬式绝缘子

悬式绝缘子分为盘形悬式绝缘子和棒形悬式绝缘子两大类。

盘形悬式绝缘子由铁帽(可锻铸铁)、钢脚(低碳钢)和瓷件(或钢化玻璃)组成(见图 1.2)。金具和绝缘件之间用水泥胶合。盘形悬式绝缘子可方便地组成绝缘子串。组成绝缘子串时,钢脚的球接头插入铁帽的球窝中,成为球绞软连接,使绝缘子串只承受拉力,不承受弯矩和扭矩。盘形悬式绝缘子结构简单,盘形结构的几何形状有多种选择,可满足不同地区的使用要求,串接成串后可在任意电压等级的输电线路使用,是高压线路上使用最广的一种绝缘子。输电线路的电压等级越高,对绝缘子抗拉强度的要求也越高。盘形悬式绝缘子的产品型号中不含电压等级,只含机械强度,例如 XP—70,表示盘形悬式绝缘子,机电破坏负荷是 70 kN。

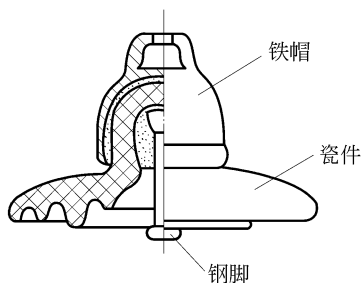


图 1.2 盘形悬式绝缘子

棒形悬式绝缘子的绝缘部件有电瓷和复合材料两大类,结构形状见图 1.3。

棒形悬式绝缘子的优点是结构简单,绝缘部件属于不可击穿型,不必检测零值。对瓷棒形悬式绝缘子而言,电瓷材料承受拉应力,因为电瓷材料本身耐压不耐拉,很难造出具有很大机械破坏负荷的产品。此类悬式绝缘子的应用面远没有盘形悬式绝缘子广泛,主要限于欧洲地区,近年来我国个别地区开始试用。棒形悬式复合绝缘子发展迅猛,在我国的使用量已超过 300 万支。复合绝缘子具有重量轻、机械强度高、制造工艺简单、耗能少、耐污闪能力强等优点,可以预见,复合绝缘子的使用量在我国将快速增长,有非常好的发展前景。

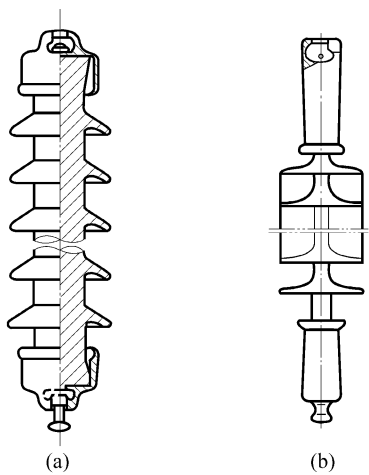


图 1.3 棒形悬式绝缘子
(a) 电瓷; (b) 复合材料

1.3.2 针式绝缘子

线路针式绝缘子主要用于 6~10 kV 的配电线路,它的结构形式如图 1.4 所示。它的顶部有一线槽,导线可固定在线槽内。20~35 kV 线路也有用针式绝缘子的,但由于老化率高,尺寸较大,已逐渐被悬式绝缘子取代。

1.3.3 横担绝缘子

横担绝缘子的材料主要有电瓷和复合材料两大类。电瓷横担绝缘子是棒形的瓷件,安装在电杆上支撑导线,既起到导线对地绝缘的作用,又起到横担的作用,结构形式见图 1.5。当电压等级较高时,对横担绝缘子的机械强度

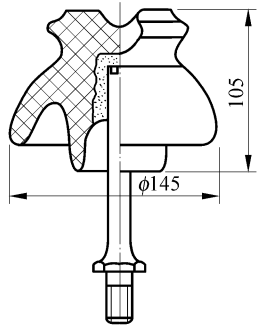


图 1.4 针式绝缘子
未标注单位的尺寸线,其单位均为 mm。

要求较高,因为横担绝缘子要承受弯矩作用,当单臂式结构不能满足要求时,可以用两组横担组成 V 形桁架结构。用硅橡胶护套和环氧玻璃芯棒复合材料制造的横担绝缘子,具有机械强度高、重量轻、耐污闪能力强等优点,已在美国获得大量应用。

1.3.4 电站支柱绝缘子

电站支柱绝缘子用作导体和接地体之间的绝缘和机械固定连接,如母线或隔离开关的支柱绝缘子等。它由实心瓷柱和上、下金属附件通过水泥胶装组成,结构形式如图 1.6 所示。支柱绝缘子沿外部空气的闪络距离和内部贯穿路径差不多相等,所以只会发生外部闪络,不会发生内部瓷介质的击穿,是不可击穿型。在电压等级较高时,可用几节支柱绝缘子串联。支柱绝缘子会承受弯矩和扭矩作用,为了提高机械强度,有时也采用几组支柱绝缘子并联的方式。近年来我国研制出以瓷柱为芯棒、以硅橡胶材料为护套的复合电站支柱绝缘子,该绝缘子以瓷棒承受机械力,因为圆柱形瓷棒比带伞裙的瓷棒容易烧制,机械强度更高,硅橡胶材料的耐污闪能力又比瓷材料高得多,因此该绝缘子的电气性能和机械性能都比电瓷电站支柱绝缘子好,具有广泛的发展前景。

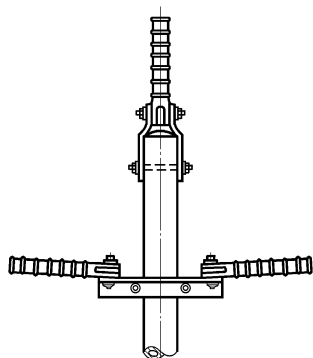


图 1.5 横担绝缘子

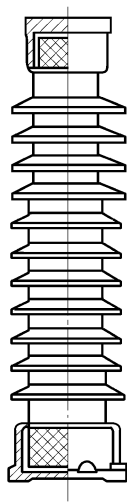


图 1.6 电站支柱绝缘子

1.3.5 瓷套

用作电器内绝缘的容器,如电流互感器的瓷套、断路器的瓷套等。对瓷套外绝缘的要求和对支柱绝缘子外绝缘的要求是一致的,都对伞裙结构有较高的要求,要

求它们有较高的耐污闪和耐雨闪能力。一般说来,瓷套的外径都较粗,随着外径的增加,绝缘子的耐污闪能力和耐雨闪能力都会下降,因此对瓷套外绝缘的电气强度有更高的要求。特别是电流互感器的瓷套,由于它的结构形状是上细下粗,伞裙间更容易被雨水桥接,耐雨闪能力较低,因此对此问题必须给予足够的注意。

1.3.6 套管

套管是将载流导线引入变压器或断路器等电气设备的金属箱内或母线穿过墙壁时的引线绝缘。套管是一种典型的电场具有强垂直介质表面分量的绝缘结构,它表面的电压分布极不均匀,在中间法兰边缘处电场十分集中,很易从此处开始电晕及滑闪放电。套管的绝缘材料以往都是采用电瓷材料,近年来出现了采用复合材料的套管,由于用作外绝缘的硅橡胶材料有很强的耐污闪能力,所以复合套管的使用量增加很快,发展势头看好。

1.4 对绝缘子的使用要求

户外绝缘子在使用中要承受多种因素的作用,如电场强度、机械应力、大气条件、使用环境等,这些因素是同时起作用的。上述这些因素对绝缘子的作用情况以及作用的严重程度与绝缘子的种类、结构形状以及所处环境有很大的关系。例如,线路悬式和耐张绝缘子要承受由导线和绝缘子自重及导线张力所决定的拉应力,大风、覆冰以及温度变化将使绝缘子所受的拉应力增加。电站支柱绝缘子要承受压应力作用,也可能承受弯矩和扭矩的作用。分析电站支柱绝缘子的受力,除了应考虑所支撑的母线、设备的作用力外,还应考虑事故状态下电流产生的电动力对绝缘子的作用。悬臂结构的横担绝缘子要承受由导线施加的弯矩作用。绝缘子还可能承受多种暂态载荷,例如在输电线路的架设过程中线路绝缘子还可能承受扭弯载荷,在导线的振动或摇摆过程中,绝缘子会承受一个振动载荷。自然界因素如飓风、地震、导线覆冰脱落,或者人为因素如车撞上杆塔、枪击绝缘子等都会使绝缘子承受一个冲击载荷。

在电气性能方面,绝缘子除了要承受稳态工频运行电压的作用外,还要承受由雷电或操作引起的暂态过电压的作用。在决定绝缘子的串长或绝缘子串的干弧距离时,要同时考虑上述三种电压的作用。比较两种暂态电压对决定干弧距离的作用,330 kV 以下主要考虑雷电过电压的作用,330 kV 以上主要考虑操作过电压的作用。在绝缘子闪络时,数以千安计的事故电流以电弧的形式沿绝缘子表面流过,绝缘子要能耐受大电弧的烧蚀直到线路保护动作。

图 1.7 给出了 14 片悬垂串绝缘子在暂态过电压作用下闪络电压和电压持续时间之间关系的试验结果,从图中可以看出冲击电压的波形以及潮湿、脏污条件对

闪络电压的影响。绝缘子在潮湿脏污条件下的闪络是一个热电离过程,完成闪络需一定的时间,雷电冲击电压的持续时间很短,潮湿或脏污条件对雷电冲击闪络电压影响很小,操作冲击电压的持续时间较长,湿闪电压明显低于干闪电压,在潮湿脏污的条件下,闪络电压会进一步降低。在工频运行电压下,潮湿和脏污条件对闪络电压的影响更为显著,绝缘子运行环境下的湿、污特征是决定户外绝缘水平的关键因素,在污秽地区确定绝缘子串长的决定性因素是运行电压下的耐污闪能力。

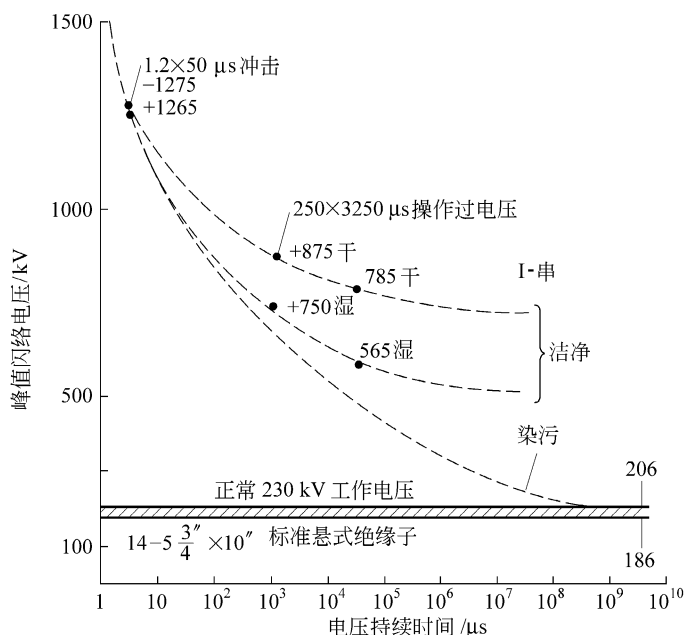


图 1.7 14 片悬垂串绝缘子在暂态过电压作用下闪络电压和电压持续时间之间的关系

为了提高绝缘子的耐污闪能力,100 余年来人们在绝缘子的形状设计上进行着不懈的努力。决定绝缘子几何形状的各参数都对绝缘子的耐污闪能力有影响,各参数中泄漏距离的影响是最大的。评价绝缘子的耐污闪能力通常用泄漏距离或爬电比距来表征;爬电比距是泄漏距离和运行电压(通常是指线电压)的比值。用这两个参数来表征绝缘子的耐污闪能力,虽然简单粗糙,但不失为一种实用的方法。为了增大绝缘子的泄漏距离,对悬式绝缘子而言,除了采用增加片数的措施外,还可将普通型绝缘子更换为大爬距或防污型绝缘子。大爬距绝缘子往往采用增大盘径的方式,防污型绝缘子或是在绝缘子的下表面用深槽密棱的方式,或是采用双层伞或三层伞的方式。对结构高度确定的支柱绝缘子,为增加泄漏距离只能采用增大伞径、缩小伞间距或在伞下表面加棱槽等措施。采用上述措施不是随意

的,在尺寸配合上有制约条件,只有在盘径和片间距离合适的比例范围内,以及绝缘高度和泄漏距离的合适比例范围内,增加泄漏距离才是有效果的,否则会适得其反。绝缘子的几何形状也有和使用环境的适应性问题。防污型绝缘子有两大类型,一种是形状复杂的钟罩型结构,一种是形状简单的空气动力型结构。钟罩型适合于污秽能迅速积聚的沿海地区,空气动力型适合于粉尘较严重的内陆地区。

不同地区的环境条件是千差万别的,不同的气象条件对绝缘子的运行性能有不同的影响。例如,温度影响几乎所有材料的绝缘性能,因为随着温度的升高,材料的电导率增加。阳光中的紫外线可使有机绝缘材料降解,使绝缘材料表面出现龟裂、粉化等现象。雨、露、雾、溶雪、溶冰等多种气象条件都能使绝缘子表面受潮湿润。比起干燥状态,潮湿状态下绝缘子的表面电阻将大大降低。如果绝缘子的表面已脏污,表面电阻的降低更为急剧,在较严重的潮湿脏污状态下,绝缘子可能无法耐受运行电压的作用,从而发生污闪事故。海拔高度也会影响绝缘子的绝缘特性,海拔越高,空气的密度越小,绝缘子的闪络电压也就越低。上述这些因素按不同的组合可同时作用在绝缘子上,设计或选择绝缘子时必须考虑上述各种因素的作用,使绝缘子在恶劣的环境及气象条件下能安全可靠地工作。

1.5 绝缘子的电气特性和机械特性对输电线路可靠性的影响

绝缘子的电气性能主要取决于采用的绝缘材料本身的性能,固体绝缘材料内部的绝缘特性和绝缘材料表面的绝缘特性都很重要,二者的作用不同,在讨论绝缘子的电气特性时,介质内部和表面的绝缘特性都必须考虑。介质内部的绝缘性能决定于介质内部所含的杂质和气孔,在杂质和气孔处电场强度较高,可能会造成永久性的绝缘损伤,这些绝缘损伤会逐步发展,如果这些损伤连成了通路,就意味着绝缘介质被击穿,不能起绝缘作用了。介质表面的绝缘强度主要取决于表面的脏污和受潮情况。电阻率可以表征介质的绝缘性能,绝缘材料的体积电阻率可达到 $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$,在干燥的状态下绝缘材料表面的电阻率也能达到这个数量级。在潮湿的状态下绝缘材料表面的电阻率可以降低几个数量级,在表面脏污和潮湿同时存在的条件下,表面电阻率可降到很低。如果介质内部没有严重的缺陷,沿绝缘介质表面的闪络电压比介质的击穿电压会低得多,故在外加电压的作用下只能发生沿面闪络,不会发生介质击穿。一般说来,闪络后产生的电弧会很快飘离绝缘表面,闪络完成后各类绝缘子的沿面绝缘都会自动恢复,属于自恢复性绝缘。

盘形悬式绝缘子铁脚和钢帽之间的绝缘介质厚度比绝缘子的泄漏距离要小得多,如果介质内部存在严重缺陷,有可能发生介质击穿,绝缘子就不能起到绝缘作用,成为零值绝缘子。输电线路的绝缘子串中若存在零值绝缘子,会使输电线路的安全运行存在隐患,对运行部门而言,须定期检测零值绝缘子,及时更换。盘形悬

式绝缘子是发生闪络还是发生击穿,取决于作用电压的波形和幅值。图 1.8 给出了盘形悬式绝缘子闪络和击穿的伏-秒特性曲线,在两条曲线交叉点的右侧,闪络电压曲线低于击穿电压曲线,也就是说当冲击电压的上升沿不是很陡时,绝缘子只可能发生闪络而不会击穿;在交叉点的左侧,击穿电压曲线低于闪络电压曲线,也就是说当冲击电压的上升沿很陡时,绝缘子的击穿电压比闪络电压低,因此绝缘子会发生击穿而不会发生闪络。上述曲线表明,盘形悬式绝缘子在幅值很高、波形的上升沿又很陡的冲击电压作用下,是有可能发生击穿的。在绝缘子的试验项目中有一项是陡波冲击试验,陡波的上升沿很陡,幅值又很高,该项试验的目的就是考核绝缘子的内绝缘。在实际运行条件下,绝缘子只可能承受雷电冲击和操作冲击电压的作用,如果盘形悬式绝缘子的介质内部没有缺陷,尽管雷电波的上升沿也比较陡,但波前时间是微秒级,属于图 1.8 两条曲线交叉点的右侧,是不会造成绝缘子击穿的。操作波的波前时间在数十微秒以上,更不会造成绝缘子的击穿。尽管雷电波或操作波有足够高的幅值,但即使在干燥状态下,也只能造成绝缘子的沿面闪络而不会发生击穿。在工频运行电压的长期作用下绝缘子更不会发生击穿,但在潮湿脏污的条件下,在运行电压下就有可能发生沿绝缘子表面的闪络,称为污闪。

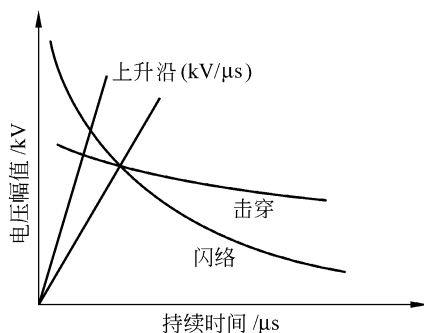


图 1.8 盘形悬式绝缘子闪络和击穿的伏-秒特性

实际运行中的绝缘子同时承受电气和机械负荷的作用,容易造成绝缘内部的损伤。如果绝缘内部已有损伤,在机电负荷的同时作用下损伤会扩大,这就是运行中绝缘子会出现零值的原因。

绝缘子是电力系统中使用量最大的电气组件,大量的绝缘子(或绝缘子串)在系统中并联工作,任何一个绝缘子发生问题,都会造成系统事故,因此对绝缘子的质量和可靠性要求是非常高的。在电力系统的实际运行中由绝缘子问题造成的事故占较大比例,特别是污闪事故危害更大,一次污闪事故往往造成长时间、大面积停电。一条线路上的一串绝缘子发生了污闪,会造成整条线路断电,变电站内的一个绝缘子发生了污闪,会造成一个地区的停电,会造成极大的经济损失,并给人们的日常生活带来很大危害。