# 高电压技术第二版张一尘习题答案

来源：网络 作者：风吟鸟唱 更新时间：2024-08-18

*高电压技术第二版张一尘习题答案第一章1—1气体中带电质点是通过游离过程产生的。游离是中性原子获得足够的能量(称游离能)后成为正、负带电粒子的过程。根据游离能形式的不同，气体中带电质点的产生有四种不同方式：1.碰撞游离方式在这种方式下，游离能...*

高电压技术第二版张一尘习题答案

第一章

1—1

气体中带电质点是通过游离过程产生的。游离是中性原子获得足够的能量(称游离能)后成为正、负带电粒子的过程。根据游离能形式的不同，气体中带电质点的产生有四种不同方式：

1.碰撞游离方式

在这种方式下，游离能为与中性原子(分子)碰撞瞬时带电粒子所具有的动能。虽然正、负带电粒子都有可能与中性原子(分子)发生碰撞，但引起气体发生碰撞游离而产生正、负带电质点的主要是自由电子而不是正、负离子。

2.光游离方式

在这种方式下，游离能为光能。由于游离能需达到一定的数值，因此引起光游离的光主要是各种高能射线而非可见光。

3.热游离方式

在这种方式下，游离能为气体分子的内能。由于内能与绝对温度成正比，因此只有温度足够高时才能引起热游离。

4.金属表面游离方式

严格地讲，应称为金属电极表面逸出电子，因这种游离的结果在气体中只得到带负电的自由电子。使电子从金属电极表面逸出的能量可以是各种形式的能。

气体中带电质点消失的方式有三种：

1.扩散

带电质点从浓度大的区域向浓度小的区域运动而造成原区域中带电质点的消失，扩散是一种自然规律。

2.复合复合是正、负带电质点相互结合后成为中性原子(分子)的过程。复合是游离的逆过程，因此在复合过程中要释放能量，一般为光能。

3.电子被吸附

这主要是某些气体(如SF6、水蒸汽)分子易吸附气体中的自由电子成为负离子，从而使气体中自由电子(负的带电质点)消失。

1—2

自持放电是指仅依靠自身电场的作用而不需要外界游离因素来维持的放电。外界游离因素是指在无电场作用下使气体中产生少量带电质点的各种游离因素，如宇宙射线。讨论气体放电电压、击穿电压时，都指放电已达到自持放电阶段。

汤生放电理论的自持放电条件用公式表达时为

γ(eαs-1)=1

此公式表明：由于气体中正离子在电场作用下向阴极运动，撞击阴极，此时已起码撞出一个自由电子(即从金属电极表面逸出)。这样，即便去掉外界游离因素，仍有引起碰撞游离所需的起始有效电子，从而能使放电达到自持阶段。

1—3

汤生放电理论与流注放电理论都认为放电始于起始有效电子通过碰撞游离形成电子崩,但对之后放电发展到自持放电阶段过程的解释是不同的。汤生放电理论认为通过正离子撞击阴极，不断从阴极金属表面逸出自由电子来弥补引起电子碰撞游离所需的有效电子。而流注放电理论则认为形成电子崩后，由于正、负空间电荷对电场的畸变作用导致正、负空间电荷的复合，复合过程所释放的光能又引起光游离，光游离结果所得到的自由电子又引起新的碰撞游离，形成新的电子崩且汇合到最初电子崩中构成流注通道，而一旦形成流注，放电就可自己维持。因此汤生放电理论与流注放电理论最根本的区别在于对放电达到自持阶段过程的解释不同，或自持放电的条件不同。

汤生放电理论适合于解释低气压、短间隙均匀电场中的气体放电过程和现象，而流注理论适合于大气压下，非短间隙均匀电场中的气体放电过程和现象。

1—4

极不均匀电场中的气体放电过程有两个不同于均匀电场、稍不均匀电场中气体放电的特性：

1.持续的电晕放电

电晕放电是在不均匀电场中，电场强度大的局部区域中发生的放电，此时整个气体间隙仍未击穿，但在局部区域中气体已击穿。在稍不均匀电场中，电晕放电起始电压很接近(略低于)间隙的击穿电压，也观察不到明显的电晕放电现象。而在极不均匀电场中则可观察到明显的电晕放电现象，且电晕放电起始电压要低于(或大大低于----取决于电场均匀程度)间隙的击穿电压。

2.长间隙气体放电过程中的先导放电

当气体间隙距离较长(＞1m)时，流注通道是通过具有热游离本质的先导放电不断向前方(另一电极)推进的。由于间隙距离较长，当流注通道发展到一定距离，由于前方电场强度不够强(由于电场不均匀)流注要停顿。此时通过先导放电而将流注通道前方电场加强，从而促使流注通道进一步向前发展。就这样，不断停顿的流注通道通过先导放电而不断推进，从而最终导致整个间隙击穿。

3.不对称极不均匀电场中的极性效应

不对称极不均匀电场气体间隙(典型电极为棒—板间隙)的电晕起始电压及间隙击穿电压随电极正、负极性的不同而不同。正棒—负板气体间隙的击穿电压要低于相同间隙距离负棒—正板气体间隙的击穿电压，而电晕起始电压则相反。解释这种结果的要点是间隙中正空间电荷产生的电场对原电场的增强或削弱。判断间隙击穿电压高低看放电发展前方的电场是加强还是削弱，而判断电晕起始电压高低则看出现电晕放电电极附近的电场是增强还是削弱。出现正空间电荷的原因是由于气体游离产生的正、负带电粒子定向运动速度差异很大，带负电的自由电子很快向正极性电极移动，而正空间电荷(正离子)由于移动缓慢，此时几乎仍停留在原地从而形成正空间电荷。对于正棒-负板气体间隙，正空间电荷的电场加强了放电发展前方的电场，有利于流注向前方发展，有利于放电发展。但此空间电荷的电场对于棒电极附近的电场是起削弱作用，从而抑制了电晕放电。对于负棒-正板气体间隙，情况则相反。这就导致上面所述击穿电压和电晕起始电压的不同。

1—5

电晕放电与气体间隙的击穿都是自持放电，区别仅在于放电是在局部区域还是在整个区域。若出现电晕放电，将带来许多危害。首先是电晕放电将引起功率损耗、能量损耗，这是因为电晕放电时的光、声、热、化学等效应都要消耗能量。其次，电晕放电还将造成对周围无线电通讯和电气测量的干扰，若用示波器观察，电晕电流为一个个断续的高频脉冲。另外，电晕放电时所产生的一些气体具有氧化和腐蚀作用。而在某些环境要求比较高的场合，电晕放电时所发出的噪声有可能超过环保标准。为此，高压、超高压电气设备和输电线路应采取措施力求避免或限制电晕放电的产生。反过来，在某些场合下，电晕放电则被利用，如利用冲击电晕放电对波过程的影响作用可达到降低侵入变电站的雷电波波头陡度和幅值。电晕放电也被工业上某些方面所利用而达到某种用途。

1—6

气体间隙的击穿电压UF是气体压力P和间隙距离S乘积的函数，这一规律称为巴申定律。这种函数关系常用曲线表示，气体种类不同，电极材料不同，这种函数关系的曲线也不同。巴申定律是由实验而不是通过解析的方法得到的气体放电规律。巴申定律的曲线是表示均匀电场气体间隙击穿电压与PS乘积之间的关系，它不适用于不均匀电场。此外，巴申定律是在气体温度不变的情况下得出的。对于气温并非恒定的情况应为UF=F(δd)，δ为气体的相对密度。

1—7

在持续电压(直流、工频交流)作用下，气体间隙在某一确定的电压下发生击穿。而在雷电冲击电压作用下，气体间隙的击穿就没有这种某一个确定的击穿电压，间隙的击穿不仅与电压值有关，还与击穿过程的时间(放电时间)有关。这就是说，气体间隙的冲击击穿特性要用两个参数(击穿电压值和放电时间)来表征，而气体间隙在持续电压作用下击穿特性只要用击穿电压值一个参数来表征。用来表示气体间隙冲击特性的是伏秒特性。冲击电压作用下气体间隙在电压达到U0(持续电压下间隙的击穿电压)值时，气体间隙并不能立即击穿而要经过一定的时间后才击穿，这段时间称为放电时延。放电时延包括两部分时延：

1.统计时延

从电压达U0值起至出现第一个有效电子为止的这段时间。统计时延的分散性较大。

2.放电形成时延

从出现第一个有效电子至间隙击穿为止的这段时延。

1—8

在同一波形、不同幅值的冲击电压作用下，气体间隙(或固体绝缘)上出现的电压最大值与放电时间(或击穿时间)的关系，称为气体间隙(或固体绝缘)的伏秒特性。伏秒特性常用曲线(由实验得到)来表示，所以也称伏秒特性曲线，它就表征了气体间隙(或固体绝缘)在冲击电压下的击穿特性。在过电压保护中，如何能保证被保护电气设备得到可靠的保护(即限制作用在电气设备绝缘上的过电压数值)，就要保证被保护电气设备绝缘的伏秒特性与保护装置(如避雷器)的伏秒特性之间配合正确。两者正确的配合应是：被保护电气设备绝缘伏秒特性的下包线始终(即在任何电压下)高于保护装置伏秒特性的上包线。

1—9

影响气体间隙击穿电压的因素主要有二个：

1.间隙中电场的均匀程度

间隙距离相同时，电场越均匀，击穿电压越高。

2.大气条件

气压、温度、湿度不同时，同一气体间隙的击穿电压也不同。气压、温度变化引起气体相对密度变化，而气体相对密度变化使得间隙击穿电压变化。气压增大或温度降低使气体相对密度变大，自由电子容易与中性原子(分子)发生碰撞，但不容易引起碰撞游离(因碰撞前自由行程短，动能积聚不够)，所以击穿电压提高。湿度改变，则改变了水蒸汽分子吸附气体中自由电子的程度，自由电子数目的改变使电子碰撞游离程度改变，从而使间隙击穿电压改变。湿度增大，水蒸汽分子吸附能力增强，气体中自由电子数减少，电子碰撞游离程度削弱，间隙击穿电压提高。由于这种吸附自由电子的过程需一定时间而均匀电场放电过程又很快，因此湿度对均匀电场气体间隙的击穿电压影响很小。海拔高度对气体间隙击穿电压的影响实际上也是通过气体相对密度来影响的。

提高气体间隙击穿电压主要从两个方面考虑：

1.改善电场分布

具体措施有改变电极形状和采用极间屏障。要注意的是：负棒-正板气体间隙极间加屏障后不一定都能提高击穿电压，这要看屏障的位置。

2.削弱游离过程

气体击穿的根本原因是发生了游离，若采取措施削弱这种游离过程，当然击穿电压就提高了。具体措施是采用三“高”：高气压，高真空，高绝缘强度的气体(如SF6气体)。

1—10

沿面闪络是指沿面放电已贯通两电极。电极间放入固体介质后的沿面闪络电压要比相同电极空气间隙的击穿电压低，这是因为沿固体介质表面的电场与空气间隙间电场相比已经发生了畸变，这种畸变使固体介质表面的电场更为不均匀。而造成沿面电场畸变的原因主要有：

1.固体介质与电极之间气隙中放电产生的正、负电荷聚集在沿面靠电极的两端。

2.固体介质表面由于潮气形成很薄的水膜，水膜中正、负离子积聚在沿面靠电极的两端。

3.由于固体介质表面电压分布不均匀，在表面电场强度大的区域中出现电晕放电。

4.固体介质表面的不平整造成沿面电场畸变。

1—11

套管表面的电场强度与表面斜交，表面的电场强度可分解成与表面垂直的分量和与表面平行的分量，垂直分量要比平行分量大许多。正由于表面电场的垂直分量较平行分量强，所以其放电过程具有与其它形式沿面放电不同的特点：

1.电压升高后，首先在套管的法兰边缘处发生电晕放电，随电压再升高而变成线状火花放电。

2.随着电压进一步提高到某一数值，出现明亮的树枝状火花放电，这种火花放电的位置不固定，此起彼伏，这种放电称为滑闪放电。滑闪放电是强垂直分量电场型沿面放电所特有的，它具有热游离的性质。出现滑闪放电时，放电仍未达到沿面闪络。

3.电压升高至沿面闪络电压，滑闪放电发展成沿面闪络。

要提高套管沿面闪络电压，可以从以下两个方面来考虑：

1.增大沿面闪络距离。但要注意：闪络电压的提高与闪络距离的增大不成正比，前者提高得慢。

2.提高套管的电晕起始电压和滑闪电压。这可以通过采用介电系数小的介质和加大套管绝缘厚度从而减小体积电容来提高；也可以通过在靠近法兰处的套管表面涂以半导体漆以减小绝缘表面电阻来提高。

1—12

绝缘子串由多片绝缘子相串联(见书P30)，每片绝缘子具有等值电容C(当然还有等值电导，但由于电导电流比电容电流小许多，故忽略)，每片绝缘子的金属部分与铁塔间有分布电容CE，与导线间也有分布电容CL(分布电容的极间绝缘就是空气)。若CE和CL都不存在，每片绝缘子等值电容C上流过电流相等，则每片绝缘子上的电压分布均匀(C上压降相等)。实际情况是存在CE和CL，由于CE和CL上电流的分流作用使得各片绝缘子上的电压分布不均匀(由于流过电流不相等而压降不相等)，中间绝缘子上分到的电压小而两头绝缘子上分到的电压大。由于CE＞CL，CE的分流作用要大于CL的分流作用，所以靠导线绝缘子上分到的电压最大。为了使绝缘子串电压分布均匀，可以在靠近导线的绝缘子外面套上一金属屏蔽环(称均压环)，此均压环与导线等电位，以此增大CL，从而使绝缘子串电压分布的均匀性得以改善。

1—13

户外绝缘子在污秽状态下发生的沿面闪络称为绝缘子的污闪。污秽绝缘子的闪络往往发生在大气湿度很高等不利的气候条件下，此时闪络电压(污闪电压)大大降低，可能在工作电压下发生闪络从而加剧了事故的严重性。防止绝缘子发生污闪的措施主要有：

1清除污秽层

这要通过监测手段及时确定清扫的时间。

2.提高绝缘子的表面耐潮性和憎水性

这是因为污秽绝缘子在受潮情况下闪络电压降低最多。具体可采用憎水性材料或在绝缘子表面涂各种憎水性材料。

3.采用半导体釉绝缘子。

第二章

2—1

极化形式

形成原因

过程快慢

损耗

受温度影响

电子式

电子轨道的相对位移

快

无

极小

离子式

正、负离子的空间位移

快

无

小

偶极子

极性电介质分子(偶极子)的转向

慢

有

大

空间电荷

空间电荷的积聚

缓慢

有

大

2—2

泄漏电流是电介质中少量带电粒子在电场(电压)作用下形成的电导电流。这种电导电流是很小的(为此冠以“泄漏”的名称)，但在高电压下可达到能被检测出的数值。电介质对电导电流的阻力称为绝缘电阻。作用电压(直流电压)、泄漏电流、绝缘电阻三者的关系符合欧姆定律。电介质的电导过程表明电介质并非绝对不导电，即绝缘电阻不等于无穷大。当固体电介质受电压作用时，除了有泄漏电流流过电介质内部(称为体积泄漏电流)外，还有电流沿电介质表面流过，这部分电流称为表面泄漏电流。绝缘试验中的泄漏电流测量是要测量体积泄漏电流，并以此来判断绝缘状况的好坏，若不采取措施消除表面泄漏电流，实际上所测到的电流应是体积泄漏电流和表面泄漏电流之和。

2—3

电导过程是带电粒子在电场(电压)作用下定向移动形成电导电流的过程。电介质的电导与金属导体的电导有两个本质的区别。其一是形成电导电流的带电粒子不同，电介质中为离子，而金属导体中为自由电子。所以电介质电导为离子性电导，而金属导体电导为电子性电导。其二是带电粒子数量上的区别，在电介质中有少量带电质点，而在金属导体中则有大量带电粒子。正由于两者带电粒子数差别悬殊，才使两者电导受温度影响的结果绝然不同。

2—4

电介质上加上直流电压后，流过电介质的电流开始较大，而后随时间衰减变小，最后稳定于某一数值，这一现象称为“吸收”现象。表面看起来似乎有一部分电流被电介质“吸收”掉了，但出现“吸收”现象的实质是电介质在直流电压(电场)作用下，电介质发生极化、电导过程综合的结果。在直流电压作用下电介质要发生极化过程和电导过程。由于极化过程，就有有损极化对应的电流ia。由于电导过程，就有泄漏电流ig。此外还有纯电容性电流ic，它表示无电介质时等值电容的充电电流以及无损极化电流。ic存在时间极短，很快衰减至零。ia经过一定时间(时间长短与时间常数raca有关)后也衰减至零，而ig不随时间变化。流过介质的总电流为i=ic+ia+ig，将三个电流分量按时间相加就得到了总电流随时间变化的曲线(见书P40图)，从而说明了出现“吸收”现象的必然性。“吸收”现象是电介质在直流电压作用下发生的。此外，若电介质的等值电容很小，吸收现象不明显。

2—5

tgδ是表征电介质在交流电压作用下内部损耗特性的参数(物理量)。tgδ反映了电介质在交流电压作用下电导损耗、极化损耗以及在电压(电场强度)较高时游离损耗的综合结果。tgδ与外加电压、频率无关(指在一定范围内)，与电介质尺寸结构无关，仅取决于内在的损耗特性。研究测量tgδ的目的不在于：介质损耗掉了多少功率(比其它原因引起的功率损耗，其要小得多)，而在于：若介质损耗大，将加速老化，最终导致绝缘性能失去而造成绝缘故障。电压在一定范围内(不是过高)，tgδ不随电压变化。但当电压过高时，由于介质内部的游离损耗而使tgδ增大。在工频电压下，频率的变动(在50Hz左右变动)不会改变tgδ值。但当频率变动很大(数倍、数十倍)，tgδ会受到频率变化的影响。在频率不很高时，tgδ随频率的升高而增大(由于单位时间内极化次数增多造成极化损耗增大)。但当频率过高时，由于偶极子来不及转向而造成极化作用减弱，使tgδ随频率升高而减小。温度变化对tgδ的影响随电介质种类的不同而不同。中性或弱极性电介质的tgδ随温度升高而增大。对于极性电介质，tgδ随温度的变化则要考虑电导损耗、极化损耗随温度变化的综合结果。见书P44，t＜t1时，两种损耗都随温度升高而增大，所以tgδ随温度升高而增大。t1＜t＜t2时，极化损耗随温度升高而减小且超过电导损耗随温度升高而增大，所以tgδ随温度升高而减小。t＞t2时，电导损耗增大很快且超过极化损耗的减小，所以tgδ随温度升高而增大。

2—6

实际使用的变压器油是非纯的液体电介质，其击穿过程与纯液体电介质是根本不同的。在变压器油中的电极间一旦形成“气泡”通道，由于气体击穿场强要比变压器油低得多，因此就发生电极之间的击穿。“气泡”通道可由两种途径形成。一种途径是油中原先存在的气泡中发生气体游离，由于游离而得到的正、负电荷向两电极方向运动而使气泡拉长，当这种气泡增多并头尾相接贯通两电极时就形成气泡通道。另一种途径是油中的水分或纤维分子受电场极化而顺电场方向排列，当这些极化的水分或纤维分子排列成贯通电极的“小桥”，流过此“小桥”的泄漏电流要比流过油中泄漏电流大，发热增加，从而使水分汽化或使用周围的油汽化，就在“小桥”周围形成气泡通道。

影响变压器油击穿电压的因素有：

1.油的品质。油的品质即油中所含水份、纤维、气泡等杂质的多少。含杂质越多，油的品质越差，击穿电压越低。

2.温度。温度对击穿电压的影响是通过油中悬浮状态水分的多少（在10℃-80℃时`)和油中含气量的多少(在80℃以上时)间接影响的。在大约80℃以下时，温度升高，油中溶解状态的水分增加，则悬浮状态水减少，从而不易形成导致击穿的“小桥”，击穿电压就升高。在大约80℃以上时，由于油中水分和油的汽化，温度升高，形成气泡增多，易形成气泡通道，击穿电压降低。

3.压力。压力增大，油中溶解状态的气体增多，从而使能形成气泡通道的自由态气体减少而使击穿电压提高。

4.电压作用时间。这主要是由于形成气泡通道需要一定的时间，所以电压作用时间越短(如雷电冲击电压)，击穿电压越高。

5.电场均匀程度。电场越均匀，击穿电压越高。

2—7

一般固体电介质的击穿强度(KV/cm)要比液体高，液体电介质的击穿场强要比气体高。

2—8

固体电介质的击穿有三种形式，它们的击穿过程与特点比较如下：

击穿形式

击穿过程(机理)

击穿强度

击穿前温度

击穿过程快慢

电击穿

碰撞游离导致

很高

不高

极快

热击穿

温度很高造成热破坏

不高

高

慢

电化学击穿

电介质劣化导致

低

不高(电击穿)

高(热击穿)

缓慢

2—9

提高固体电介质击穿电压措施有：

1.改进绝缘设计。这主要从绝缘材料(选用绝缘强度高的材料)、绝缘结构(使绝缘尽量处于均匀电场中)以及组合绝缘这三个方面来考虑。

2.改进制造工艺。使绝缘材料保持良好的先天绝缘性能，主要是减少杂质、气泡、水分等。其中尤其是所含气泡，因不能采取措施补救(如所含水分可通过烘干减少)而埋下今后引起电老化的隐患。

3.改善运行条件。这主要是防潮和加强散热冷却，这也是运行部门应注意的。

2—10

固体电介质的老化主要有电老化和热老化两种形式。电老化的主要原因是介质内部气泡中的局部放电。由于这种局部放电造成长期的机械作用(带电粒子撞击固体介质)、热作用(放电引起温度升高)、化学作用(放电产生某些腐蚀性气体)而使介质逐渐老化。热老化的原因是介质长期受热作用发生裂解、氧化等变化而使机械和绝缘性能降低。热老化的进程与电介质的工作温度有关，不同介质为保证一定热老化进程(运行寿命10年)所允许的最高工作温度是不同的，以这种允许最高工作温度的不同，固体绝缘材料被划分成七个耐热等级。要注意的是：每种耐热等级的最高允许温度并不是绝对不可超过的(后果是寿命缩短)。运行寿命10年是指此种耐热等级固体绝缘材料持续保持此最高允许工作温度时的运行寿命为10年，而一般电气设备不可能持续保持在此最高允许工作温度下运行，所以一般运行寿命可达20～25年。

第三章

3—1

对已投入运行电气设备的绝缘按规定的试验条件、试验项目、试验周期进行的定期检查或试验，称为预防性试验。通过试验及早和及时发现设备绝缘的各种缺陷(制造过程中潜伏的、运输过程中形成的、或运行过程中发展的)，并通过检修将这些绝缘缺陷排除，从而起到预防发生事故或预防设备损坏的目的，所谓预防性的含义就在于此。电气设备绝缘的预防性试验可分为两大类：

1.绝缘特性试验。也称非破坏性试验，它是指在较低电压(低于或接近额定电压)下通过测量绝缘的各种特性(如绝缘电阻、介质损失角正切tgδ等)的各种试验。由于试验电压低，所以在试验过程中不会损伤电气设备的绝缘。

2.耐压试验。耐压试验时，在设备绝缘上施加各种耐压试验电压以考验绝缘对这些电压的耐受能力。耐压试验电压则模拟电气设备绝缘在运行过程可能遇到的各种电压(包括过电压)的大小和波形。由于耐压试验电压大大高于额定工作电压，所以在试验过程中有可能(但不一定)对绝缘造成一定的损伤(即破坏)，并有可能使原本有缺陷但可修复的绝缘发生击穿。因此，尽管耐压试验较绝缘特性试验更为直接和严格，但须在绝缘特性试验合格后才能进行。

3—2

用兆欧表测绝缘电阻实质上是测流过绝缘的电流并将此电流值转化为电阻值从兆欧表上直接读出。当绝缘等值电容量较大时，由于吸收现象(电流由大变小并趋于一稳定值)较为明显，所以兆欧表读数由小逐渐增大并趋于一稳定值。出现此种现象的根本原因是，绝缘介质在直流电压作用下发生极化、电导过程的综合结果，具体解释见2—4题解答。兆欧表屏蔽端子的作用主要是为了消除测量过程中表面泄漏电流引起的测量误差(使测得绝缘电阻偏小)。采用屏蔽端子后，表面泄漏电流经屏蔽端子直接流回直流发电机(见书P53图)而不再经过电流线圈，这样就消除了表面泄漏电流。

3-3

吸收比规定为测绝缘电阻时60秒时读数与15秒时读数的比值，对于等值电容量较大电气设备的绝缘，可以根据吸收比K的大小来判断绝缘是干燥还是受潮，这是因为：

绝缘干燥时

绝缘受潮时

绝缘干燥时，泄漏电流分量ig很小，在15秒时的电流i=ic+ia+ig要比在60

秒时的电流i=

ig要大许多，这样就较大(一般大于

1.3)；而若绝缘受潮，泄漏电流分量ig要比干燥时大，在15秒时的电流比60

秒时的电流相对大得要少一些，这样就较小(K＜1.3)。

3—4

被试品一端接地(如被试对象为电气设备对地绝缘)时，测量直流泄漏电流的接线图如书P75图3—22所示。试验变压器T为升压变压器以获得交流高压。调压器T1调节加至试验变压器低压绕组上的电压以从高压绕组获得试验规定所要求的电压。试验所需的高压直流电压由高压交流整流而得，一般用高压硅堆经半波整流而得到。当所需试验电压较高时可采用倍压整流或串级直流整流线路获得。图3—22中的C为滤波电容器，当被试品等值电容CX较大时，CX就兼作滤波电容而无需另加C。保护电阻R0的作用是限制试验中万一被试品被击穿时的短路电流以保护试验变压器、整流硅堆，以及防止避免被试品绝缘损坏的扩大。微安表是用来测量泄漏电流的，由于此时被试品一端已接地，所以微安表只能串接于被试品的高电位侧，微安表及微安表至被试品的高压引线须采用屏蔽接法以使微安表至被试品间高压引线的对地漏电流以及被试品的表面泄漏电流不通过微安表。要注意屏蔽层对地处于高电位。另外还要注意：凡是直流试验(直流泄漏，直流耐压)，试验电压都是对地负极性的电压，为此硅堆整流方向不能接错。

3—5

采用正接线测tgδ时，电桥本体对地处于低电位，如书P57图3—4所示。采用反接线测tgδ时，电桥本体对地处于高电位，如书P58图3—5所示。正接线适用于被试品CX一端不接地或虽一端为外壳但被试品可采用绝缘支撑起来(如在试验室中)的场合，而反接线则适用于被试品一端接地的场合。由于现场电气设备绝缘一端(铁芯和外壳)都是接地的，因此现场试验时都采用反接线。在现场测量tgδ时可能会受到交变电场和磁场的干扰，一般电场干扰影响较大。为消除外电场的干扰，可采取两种具体措施，一是移相法，二是倒相法。两种方法都可以消除外电场对测量结果的影响(倒相法时，根据正相、反相两次测量结果由

计算求得)，但采用倒相法比较简便(无需移相设备)，实

际上往往采用算术平均法计算

交变磁场对tgδ测量的影

响主要通过检流计来影响。消除这种磁场影响的措施是通过检流计极性转换开关(将检流计正接及反接)测量两次，然后取两次测量结果的算术平均值。

3—6

工频交流耐压试验原理接线图如书P65图3—12所示。试验变压器T2为升压变压器以获得工频高压。调压器T1调节试验变压器初级电压以使试验变压器高压侧电压达到规程规定的试验电压值。保护电阻r起到保护试验变压器在被试品万一被击穿或闪络时不受损坏，这种作用不仅由于r的接入而限制了被试品击穿或闪络后的短路电流，而且还限制了在此过程中试验变压器内部的电磁振荡从而保护了试验变压器绕组的纵绝缘(匝间或层间绝缘)。保护球隙F用来限制试验过程中可能出现的过电压，其放电电压可整定为试验电压的1.1～1.15倍。R为球隙的保护电阻，用来限制球隙放电时的电流从而避免球隙表面烧毛。

工频交流耐压试验时所加的试验电压应根据不同电压等级按规程的要求。规程中所规定的试验电压值不仅考虑到电气设备绝缘在实际运行中可能受到的工频过电压，而且考虑到可能受到的雷电过电压和内部过电压，尤其是220KV及以下电压等级电气设备，通过工频交流耐压试验间接地考验了绝缘耐受内外过电压的能力。

当被试品等值电容量较大时，工频交流耐压试验的试验电压不能在低压侧测量后按试验变压器的变比换算至高压侧，而应该在高压侧的被试品上直接测量。见书P70图3—15，若在低压侧加上按试验电压折算到低压侧的应加电压，即加

上电压K为试验变压器的变比。当被试品等值电容量很小，则高压侧电

流(I1≈IC=UωCX)很小可忽略，高压侧接近开路，高压侧被试品上电压接近U试。但当被试品等值电容量较大时，高压侧电流I1≈IC不能忽略。此时，在高压侧回路中为试验变压器高压绕组中的感应电势，其数值等于高压侧的开路电

压。按变比的定义，当低压侧加上的电压时，U1就等于U试。根据高压侧

回路的等值电路及相量图(见书P70图3—16)，可见此时实际作用在被试品上的电压已大大超过试验电压U试，这就是“容升效应”。由于工频耐压试验电压已大大高于额定工作电压，所以这种实际试验作用电压的“过量”(超过规定的试验电压)将导致电气设备绝缘的不必要的损坏。为避免此种情况，就需在被试品两端间直接进行高压测量。

3—7

进行直流耐压试验主要是出于以下几个方面的需要：

1.直流电气设备的耐压试验。为考验设备绝缘耐受各种电压(包括过电压)的能力，这与交流电气设备的工频交流耐压试验相对应。

2.替代工频交流耐压试验。有些交流电气设备的等值电容量较大(如电容器、电缆)，若进行工频交流耐压试验则需要很大容量的试验设备而不容易做到，为此用直流耐压试验替代，当然试验电压值须考虑到绝缘在直流电压作用下的击穿强度要比在交流电压下高这一特点。

3.旋转电机绕组端部的绝缘试验。对于绕组端部绝缘的缺陷，采用工频交流耐压试验不易发现而采用直流耐压试验易发现。

4.结合直流泄漏试验同时进行。直流耐压试验和直流泄漏试验都采用直流电压，只不过电压的高低不同，所以在进行直流泄漏试验时，可同时进行直流耐压试验，并可根据泄漏电流随所加电压变化的不同特点来判断绝缘的状况。

直流高压可用以下几种方法测量：

1.用球隙测量。直流有脉动时测到的是最大值。

2.用静电电压表测量。直流有脉动时测到的是有效值。

3.用高阻值电阻串微安表测量。直流有脉动时测到的是平均值。

4.用高阻值电阻分压器测量。直流有脉动时测到的是平均值。

工频交流高压可用以下几种方法测量：

1.用球隙测量。测量工频交流电压的幅值。

2.用静电电压表测量。测量工频交流电压的有效值。

3.用电容分压器配低压仪表测量。测量何种值取决于低压仪表。

4.用电压互感器测量。

3—8

局部放电可采用电气或非电气的方法进行测量。在各种电气检测法中用得最多的方法是脉冲电流法。脉冲电流法通过检测视在放电量q，并以其大小来反映局部放电的强弱。局部放电的等值电路如书P62图3—9所示。气隙F放电(表示绝缘中的局部放电)时，使气隙上电压(即C0上电压)从UF降至US，气隙放电的电荷量(真实局部放电量)qs≈(C0+C1)(UF-US)。但qs无法测得，这是因为C0、C1无法测得。由于气隙F的放电会引起气隙两端的电压的变动(从UF降至US)，而气隙上电压(即C0上电压)的变动又会引起被试品上(即C2上)电压变动了ΔU，ΔU可以通过测量回路测得，这样被试品上等值放电量(称为视在放电量)q就可以

由q=(C1+C2)ΔU计算得到。根据qs、ΔU、q三者的表达式可得到

说明实际测得的视在放电量不等于真实放电量qs。由于C0>>C1，所以视在放电量要比真实放电量小许多。尽管如此，视在放电量的大小还是间接地反映了真实放电量的大小。

局部放电的脉冲电流测量法有三种基本测量回路，见书P63图3—11所示。通过测量回路将被试品CX上由于局部放电而产生的电压变动信号(表现为电压脉冲)从测量阻抗上Zm上取出，然后再经过放大电路放大后进行测量，而工频电压被隔离(实际上脉冲电流流过Zm而工频电流被阻塞。脉冲电流法由此而得名)。图3—11中(a)适用于被试品一端接地的情况，(b)适用于被试品不接地的情况。这两种方法称为直接法，其缺点是抗干扰性能较差。(c)采用电桥平衡回路，称为平衡法，其抗外部干扰性能较好。

3—9

冲击电压发生器是产生雷电冲击试验电压和操作冲击试验电压的装置。冲击电压发生器的利用系数(也称效率)定义为发生器输出电压Um(即被试品上电压)与发生器充电主电容(多级电压发生器时为各级主电容串联后的等值电容)在形

成冲击电压前所充电压U0的比值，即对于低效率(低利用系数)

回路的冲击电压发生器，对于高效率回路的冲击电压发生器，冲击电压发生器产生冲击电压的过程(参见书P79图3—27)

为：

1.冲击主电容上充至U0电压。对于多级冲击电压发生器，这一过程需经点火球隙触发放电后将各级电容串联起来而实现。

2.放电球隙点火击穿后，经R1向被试品等值电容充电，使被试品上电压升高，由于R1阻值较小，C2比C1小得多，时间常数R1C2较小，这样C2上电压升高很快，从而形成冲击电压的波前部分。故R1称为波头电阻。

3.当C2上电压达到最大值后，反过来经R1并与C1一起经R2放电，被试品C2上电压下降。由于R2比R1大得多，这样C2上电压下降较慢而形成冲击电压的波尾部分，R2也就称为波尾电阻。

第四章

4—1

波阻抗与集中参数阻抗虽都用Z表示，但有以下几点不同：

1.波阻抗是表示分布参数线路(或绕组)的参数，阻抗是表示集中参数电路(或元件)的参数。

2.波阻抗为分布参数线路(或绕组)上同一方向(即前行或反行)电压波与电流

波的比值，且但不一定等于Z，因

而阻抗则等于此阻抗上电压与电流之比，3.波阻抗不消耗能量，而当R≠0时阻抗消耗能量。

4.波阻抗与线路(或绕组)长度无关L0、C0为单位长度电感和

电容)，而阻抗与长度(如线路长度)有关。

另外需指出的是，同样的一条线路在讨论雷电或操作过电压作用下时要用分布参数的波阻抗来表征，而讨论工频稳态电压作用下时则用集中参数电路(如π型)的阻抗来表征。

4—2

(1)此题求解与书P92例4—2相同，此时n=3，所以

(2)由于相同电压同时沿两条线路侵入，两条线路上离变电站母线等距离对应点是等电位的，这样就等价于一条波阻抗为的线路进波，即

对应的彼德逊等值电路

为

母线上电压为

此小题也可采用迭加原理求解，每次一条线路进波，其余两条线路不进波，即第一小题的情况，然后将两种结果迭加，同样得到

此结果从能量角度也不难理解。

4—3

根据题意，波阻抗为280Ω的线路Z1与波阻抗为400Ω的电机绕组Z2相联接，为保护电机绕组匝间绝缘而在联接点需接多大对地并联电容C。

已知

4—4

设开关S在t=0时合闸。开关合闸后线路上就有一幅值为U0=100

KV的无穷长直角电压波自A向B传播，在t=1μs时，此电压波传至C点，对应的电流

波也传至C点，电流波的幅值为U0的电压波在t=2μs时

传至B点并发生负的全反射，而此负的反射波电压(-U0)在t=3μs时传至C点从而使C点的电压变为零(U0+(-U0))。负的反射波电压-U0在t=4μs时到达A点应使A点电压变为零，但实际上由于电源的恒压作用，A点仍保持U0的电压，这就相当于空载线路又一次合闸电源，从而重复前述过程。对于C点的电流

t＜1μs

i=0

1μs＜t＜3μs

3μs＜t＜5μs

t＞5μs之后重复上述过程。所以C点电压、电流波形如图所示。

4—5

此题的集中参数等值电路如书P96图4—12(b)所示。根据此等值电路可列出微分方程

解此微分方程可得折射波电流电压为

根据

u1q+u1f=u2q可求出反射波电压电流

(1)稳定时(即t→∞)，入射波电压电流为

折射波电压电流为

(2)各电压电流波形如图所示

(3)并联电容C的作用主要是降低作用在Z2上电压的波头陡度。见上述波形，侵入波波头陡度为无穷大(u1q为阶跃波电压)，而经过并联电容C后，作用到Z2上电压的波头陡度已按指数规律上升，C的电容量越大，波头陡度越小，有利于Z2为绕组时的纵绝缘(作用电压陡度越大，匝间、层间电压越高)。虽然串联电感也可降低侵入波的波头陡度，但由于反射电压的不同，使Z1上出现的最大电压值是不同的。采用串联电感时，Z1上出现的最大电压为

而采用并联电容时，Z1上出现的最大电压为

对本题具体数据，采用并联电容时Z1上电压最大值为400KV，若采用串联电感时，Z1上出现的最大电压可达600

KV。

4—6

地线1对地的平均高度为

导线2对地的平均高度为

(1)地线1的自波阻抗

导线2的自波阻抗

地线1与导线2间的互波阻抗

(2)地线1、导线2双导线系统的电压方程为

由于导线2对地绝缘，所以i2=0，则电压方程变为

根据耦合系数的定义，地线1对导线2的耦合系数为

4—7

在冲击电压作用下，变压器绕组要用具有电感、电容和电阻的分布参数电路来等值，如书P108图4—23所示(图中电阻未表示)。对于这种分布参数的电路，初始(t=0+时)电压分布(绕组各点对地电位)与稳态(t→∞时)的电压分布是不同的，所以在冲击电压作用下此等值电路必有一个从起始电压分布变为稳态电压分布的暂态过程，而由于此等值电路中既存在电感又存在电容，电阻又很小，因此这种暂态过程表现为振荡型的。

冲击电压波前部分，电压对时间的变化率很大，即这种电压的等值频率很

高，使绕组分布电容的阻抗很小，而分布电感的阻抗(ωL)

很大，这

样起始电压基本上按电容分布，使电压分布很不均匀，绕组靠近冲击电压作用端分到的电压大，而绕组另一端分到的电压很小。当暂态过程结束而达到稳态时，电感近于短路，电容近于开路，电压按绕组的电阻均匀分布，这就是引起绕组起始电压分布与稳态电压分布不均匀的原因。

第五章

5—1

排气式避雷器由内外两个放电间隙串联组成，外间隙暴露在大气中，而内间隙置于产气管内，所以排气式避雷器又称管式避雷器。产气管由产气材料制成，这些材料遇高温会分解产生气体。排气式避雷器一端接地，另一端与被保护设备联接。当雷电过电压作用到被保护设备上，也就同时作用在排气式避雷器上，内外间隙同时击穿使雷电流经间隙流入大地从而保护了被保护设备。雷电过电压的作用时间是非常短暂的，当过电压作用结束后，排气式避雷器上的作用电压就是工频工作电压，间隙中的电弧从冲击电弧变为工频电弧，工频电弧电流(称为工频续流)就是系统在该点的短路电流。在工频电弧的高温作用下，产气管产气材料分解产生大量气体使管内压力骤增而从喷口猛烈喷出，这对工频电弧形成强烈的纵吹作用，使工频电弧经1～3个周波后，在工频续流过零时熄灭。与放电间隙相比，不同点在于排气式避雷器熄弧能力强，经1～3工频周期后在电弧电流过零时熄弧从而防止了工频短路引起跳闸，避免了供电的中断。排气式避雷器与放电间隙相同之处在于过电压引起动作后都形成截波，这对被保护设备是有绕组的设备非常不利(威胁纵绝缘)。此外由于存在外间隙，放电分散性较大，这也与放电间隙相同，所以排气式避雷器一般只作线路保护和发变电站的进线段保护。

5—2

阀式避雷器与氧化锌避雷器的工作原理相同，且都能避免在被保护设备上产生截波，但由于两者采用的非线性阀片电阻材料不同，使得两种避雷器的性能有以下的不同：

1.保护性能。由于氧化锌避雷器的阀片电阻非线性更好以及一般无放电间隙，氧化锌避雷器抑制过电压的能力要比阀式避雷器好。

2.适用范围。阀式避雷器阀片的通流容量较小，所以一般只适用于限制雷电过电压以及过电压能量较小的内部过电压(如切空载变压器过电压)，而氧化锌避雷器不仅可限制雷电过电压，由于阀片通流容量大，所以也可以用以限制内部过电压(如切合空载线路过电压)；阀式避雷器动作后工频电弧的熄灭要依赖于工频续流的过零，但在直流系统中无这种过零，所以阀式避雷器就不能用于直流系统，氧化锌避雷器工频续流的切断是依靠阀片电阻优良的非线性(在工频电压下电阻异常的大)，所以可用于直流系统。

3.运行环境的影响作用。阀式避雷器有放电间隙，间隙放电电压的分散性使阀式避雷器性能易受温度、湿度、气压、污秽等环境条件的影响，而氧化锌避雷器由于无放电间隙，所以不会受到这些运行环境的影响。

此外，氧化锌避雷器维护简单，省去了放电间隙定期清理。氧化锌避雷器具有上述各种优点，但运行过程中由于没有放电间隙隔离工频工作电压，故应注意阀片电阻的老化问题，所以应定期检测氧化锌避雷器的工频泄漏电流，尤其是工频泄漏电流中的阻性电流分量(其大小直接反映出阀片电阻的老化程度)。

5—3

避雷器是限制过电压从而使与之相并联电气设备绝缘免受过电压作用的器件。对避雷器的第一个要求是能将过电压限制到电气设备绝缘能耐受的数值，这就要求避雷器的最大残压(残压为冲击电压作用下，流过避雷器的冲击电流在避雷器上的压降)应低于设备绝缘的冲击耐压值。对于阀式避雷器还需要保证避雷器的伏秒特性(取决于放电间隙)与被保护设备绝缘的伏秒特性有正确的配合，以免发生电气设备绝缘先于避雷器间隙放电前发生击穿。避雷器仅满足上述要求还是不够的，对避雷器的第二个要求是应在过电压作用结束之后，能迅速截断随后发生的工频续流以不致于发生工频短路引起跳闸而影响正常供电。阀式避雷器与氧化锌避雷器利用阀片电阻在工频电压下电阻很大的非线性特性使工频续流能在第一次过零时就截断。第三个要求是避雷器(阀式和氧化锌)还应具有一定的通流容量以免发生热过度而造成瓷套爆裂。

表征阀式避雷器与氧化锌避雷器的电气参数有所不同：

1.阀式避雷器

冲击放电电压和残压(一般两者数值相同)是衡量限制过电压能力的参数，其数值越低对被保护设备绝缘越有利。灭弧电压是保证避雷器可靠灭弧(即截断工频续流)的参数，避雷器安装点可能出现的最高工频电压应小于灭弧电压。工频放电电压是保证阀式避雷不在内过电压下动作的参数。体现阀式避雷器保护性能与灭弧性能的综合参数是保护比(残压与灭弧电压之比)和切断比(工频放电电压与灭弧电压之比)。

2.氧化锌避雷器

残压(分雷电冲击残压、操作冲击残压、陡波冲击残压)是衡量氧化锌避雷器对不同冲击过电压限压能力的参数。持续运行电压和额定电压是保证氧化锌避雷器可靠运行所允许的最大工频持续电压和最高工频电压(非持续性)。1mA直流和工频参考电压是反映氧化锌避雷器热稳定性及寿命的参数。荷电率(持续运行电压峰值与参考电压之比)是表征氧化锌阀片电阻在运行中承受电压负荷的指标。

5—4

设针高h小于30m，则高度影响系数P=1，已知被保护物高度hx=10m，以及在hx下的保护范围

rx=15m

若h≤2hx(即h≤20m)

h-hx=rx

h=rx+hx=15+10=25m

(与h≤20m的假设不符，舍去)

若h≥2hx(即h≥20m)

1.5h-2hx=rx

(注意，不能四舍五入法)

所以避雷针针高至少应为23.34

m。

5—5

此题为等高4针联合保护。第一步将4针分成二个等高3针，第二步在每个等高3针中，计算出在被保护高度hx下在每二等高双针间的最小保护距离bx，若三个bx都大于等于0，则在此三针所构成三角形内的所有范围都能得到保护；若有一个bx＜0，则由此等高三针联合保护范围仅为bx≥0双针保护范围的组合。

对于1和2的等高双针

rx=h-hx=17-10=7

m

bx=1.5(h0-hx)=1.5(11.286-10)=1.93

m

对于1和3的等高双针

rx=h-hx=17-10=7

m

bx=1.5(h0-hx)=1.5(8.92-10)＜0

所以对于1、2、3等高三针，其保护范围仅为1

和2、2与3两等高双针保护范围的组合。同理，对于1、3、4等高三针，保护范围也是3和4、1和4两等高双针保护范围的组合。4针对10m

高度被保护物体的保护范围如图所示(实线所围

区域，不包括中间的一块)。

5—6

单个垂直接地体的工频接地电阻Rg为

单个垂直接地体的冲击接地电阻Rch′为

Rch′=αchRg=0.65×69=45

Ω

由3根垂直接地体连接后的整个接地装置的冲击接地电阻Rch为

第六章

6—1

雷电放电是一种自然现象，至今还没有有效措施能阻止雷电发生。在输电线路的各种防雷措施中，最基本或首要措施就是架设避雷线防止雷直接击于线路的输电导线上，更严格地讲，架设避雷线后使雷直接击于导线上的概率(即绕击率)比无避雷线时大大降低。此外，架设避雷线后，由于分流作用与耦合作用，也有利于防止雷击塔顶后通过“反击”使导线上形成过电压，也有利于降低导线上的感应雷过电压。

架设避雷线后虽然大大降低了雷电直接击于导线在导线上形成过电压的概率，但仍有很大可能出现雷电击于线路杆塔塔顶，塔顶电位升高后通过绝缘子串闪络(称为反击)在导线上形成过电压，对此可采取降低杆塔接地电阻，架设耦合地线，加强线路绝缘(通过增加绝缘子片数)以及对双回路线路采用不平衡绝缘等措施来防止雷击塔顶后绝缘子串发生闪络。

然而，采取以上各种措施后仍不能完全避免绝缘子串不发生闪络。万一出现这种情况时，线路防雷的进一步措施是防止绝缘子串由冲击闪络转变为工频电压下的闪络(这种闪络可建立稳定的工频电弧而引起线路跳闸)，这可采用消弧线圈接地(在中性点不接地系统中)的措施。

最后，尽管采取了上述一道道“防线”，但仍不能绝对保证不会引起工频闪络导致线路跳闸，对此可装设线路自动重合闸装置来提高供电可靠性，而且实践证明，对由雷电引起线路跳闸的重合成功率是很高的。

6—2

35KV及以下电压等级输电系统一般都为中性点不接地系统，当发生由雷电引起的冲击闪络后，随后出现的工频闪络电流很小，不能形成稳定的工频电弧，因此不会引起线路跳闸，所以当一相由于雷击而引起闪络后仍能正常工作。这样虽不装设避雷线，雷击引起的闪络概率增大，但这种闪络并不会导致线路跳闸而影响正常供电，故35KV及以下输电线路一般不架设避雷线。对于无避雷线的线路，一相闪络后再出现第二相闪络，形成相间短路，出现大的短路电流，才可能引起线路跳闸，只有当雷电流很大时才会出现这种情况。

6—3

(1)避雷线对地平均高度hb与导线对地平均高度hd为

(2)避雷线对外侧导线的几何耦合系数K0

考虑电晕影响，查表4—1得电晕修正系数K1=1.25

K=K1K0=1.25×0.229=0.286

(3)查表6—1得电感0.5μH/m

Lgt=0.5×29.1=14.55μH

查表6—2得分流系数β=0.88

(4)雷击杆塔时的耐雷水平I1

(5)雷绕击于导线时的耐雷水平I2

(6)雷电流幅值超过I1、I2的概率P1、P2

P1=14.23%

P2=73.1%

(7)查表6—4得击杆率

计算

建弧率

绕击率

(8)线路雷击跳闸率

6—4

此题为中性点不接地35KV系统，无避雷线。雷击线路只有两种情况，即直击导线或雷击杆塔，但两者都造成一相(最高的一相)的绝缘子串闪络(设计已保证导线间不会发生空间闪络)，而一相闪络(闪络后一相接地)后线路不会跳闸，而要等到一相闪络后第二相再闪络（即前闪络相向后闪络相反击)，出现相间短路形成稳定的工频电弧后才会发生跳闸，所以耐雷水平和雷击跳闸率都根据这种情况来计算，并且可以借用有避雷线线路的计算公式进行适当修正后直接计算，因为一相先闪络后，该相已接地，这与有避雷线线路的情况相类似。

耐雷水平的计算公式为

与书P141上(6—11)式相比，相当于β=1(无避雷线所以无分流)，式中hb取先闪络相导线的平均高度，hd为后闪络相导线的平均高度，K0为先后闪络两相导线间的几何耦合系数，K为考虑电晕影响后的耦合系数。对于本题先闪络相为最高相，后闪络相为右侧相，因与最高相之间的距离较大，耦合系数较小，该相绝缘子上电压较高而易闪络。对于本题hb=h1≈hg，hd=h2

最高相导线的平均高度

右侧相导线的平均高度

耐雷水平

雷电流幅值超过I的概率

P=63%

建弧率

η=(4.5×29.170.75-14)%=42.5%

线路雷击跳闸率

第七章

7—1

变电所防止直击雷的措施是装设避雷针或避雷线，并配合以良好的接地。为了使避雷针或避雷线能对被保护对象进行有效的保护，首先应使被保护对象处于避雷针或避雷线的保护范围之内，其次还应防止避雷针或避雷线受到雷击后发生对被保护对象的闪络(即反击)。因为即使被保护对象处于保护范围之内，但若出现反击，高电位就会加到被保护对象(如电气设备)上，所以防止反击与保护范围同样重要。为防止反击，应使避雷针(线)与被保护对象之间的空间距离以及两者地下接地体之间的距离具有足够的数值。当独立式避雷针的工频接地电阻不大于10Ω时，上述两种距离不应小于5米和3米。为防止反击，35KV及以下变电所不能采用构架式避雷针；易燃、易爆设备(如储油罐)也不能采用构架式避雷针。对于110KV及以上电压等级中的构架式避雷针应使避雷针构架的地下接地体与系统接地体之间的距离保持在15米以上。另外，主变压器的构架也一般不装避雷针。

7—2

变电站中有许多电气设备，所以不可能也没有必要在每个电气设备旁都安装一组(三相)避雷器加以保护。这样，避雷器与被保护设备之间就有一段长度不等的距离，此距离不是空间的距离，而是沿连接线的距离，故称为电气距离。在这种情况下，当阀式避雷器动作时，由于波在避雷器至被保护电气设备之间电气距离内的折射与反射，会使得作用于被保护电气设备上的电压高于避雷器端点上的电压，也就是说，使电气设备绝缘上的最大电压高于阀式避雷器的最大残压(220KV及以下电压等级为流过5KA冲击电流时的残压，500KV电压等级为流过10KA冲击电流时的残压)。电气距离越长、侵入波波头陡度越陡，电压高出越多。

7—3

避雷器与被保护电气设备的绝缘配合中，都以阀式避雷器(或氧化锌避雷器)的最大残压来配合，避雷器的最大残压为允许流过避雷器最大冲击电流下的残压。在220KV及以下系统中，流过避雷器的最大冲击电流为5KA(保护旋转电机的阀式避雷器为3KA)。若在实际运行过程中出现流过避雷器的冲击电流超过此规定值，则由于避雷器最大残压的升高而危及被保护电气设备绝缘。要使流过避雷器的冲击电流不超过规定的5KA(500KV为10KA)，具体措施就是采用进线段保护。由于进线段(靠近变电站的1-2Km的一段线路)的耐雷水平要较其余部分线路的耐雷水平高，所以可以认为雷电侵入波主要来自于1-2Km进线段之外的线路上落雷所造成。这样，雷电侵入波通过进线段再作用到避雷器上，在此过程中由于进线段波阻抗的串入，减小了流过避雷器的冲击电流并将其限制到不超过5KA(10KA)。此外，雷电侵入波在进线段传播时由于出现冲击电晕，从而同时又降低了进入变电站雷电侵入波的波头陡度，有利于对电气设备的保护。

7—4

变电站进线保护段的作用有二个，其一是限制雷电侵入波电压作用下流过避雷器的电流，其二是降低最终进入变电站雷电侵入波的波头陡度。对进线保护段的要求是其应具有比线路更高的耐雷水平，为此这段线路的避雷线应具有更小的对导线的保护角，而全线无避雷线线路则当然应在这段线路上架设避雷线。

7—5

变电站进线段保护标准接线中，对1～2公里这段线路采取加强防雷措施(如减小保护角)，使其具有较高的耐雷水平。保护进线段的作用是限制避雷器动作时流过的冲击电流不超过允许值以及降低进入变电站的雷电侵入波电压的波头陡度。对于线路在雷雨季节可能处于开路状态而线路另一侧又带电(如双端电源线路)时，应在进线段末端对地装设排气式避雷器(或阀式避雷器)，目的在于防止线路上有雷电波侵入时，由于断路器打开而在线路末端发生全反射引起冲击闪络，再导致工频对地短路，造成断路器或隔离开关绝缘部件烧毁。要注意的是，断路器和隔离开关合闸时，该排气式避雷器不应在雷电侵入波作用下动作，以免产生截波危及有绕组电气设备的纵绝缘。

7—6

直配电机是指不经变压器而直接与架空线相连接的旋转电机(发电机或高压电动机)。直配电机防雷保护的主要措施(参见书P164图7—18)为：

1.在电机母线上装设FCD型阀式避雷器或氧化锌避雷器以限制雷电侵入波的幅值。

2.在电机母线上对地并电容器，每相约0.25-0.5μF(若接有电缆段，电缆对地电容包括在内)。电容器的作用是降低雷电侵入波的陡度以保护电机纵绝缘，同时还起到降低架空线上的感应雷过电压(此过电压也作用到电机上)。

3.在直配电机进线处加装电缆段和排气式避雷器(或阀式避雷器线)、电抗器，联合保护以限制避雷器动作电流小于规定值(3KA)。

4.发电机中性点有引出线且未直接接地(发电机常这样)时，应在中性点上加装避雷器保护中性点的绝缘，或者加大母线并联电容以进一步限制雷电侵入波陡度。

电缆段的作用不在于电缆具有较小波阻抗和较大的对地电容，而在于在等值频率很高的雷电流作用下电缆外皮的分流(由于FE1动作)及耦合作用。当雷电侵入波使电缆首端排气式避雷器(为使此避雷器由于发生负反射不能可靠动作而前移70m，即FE1)动作时，电缆芯线与外皮短接，相当于把电缆芯和外皮连在一起并具有同样的对地电压iR1。在此电压作用下电流沿电缆芯和电缆外皮分两路流向电机。由于流过电缆外皮绝缘所产生的磁通全部与电缆芯交链(由于电缆芯被电缆外皮所包围)，在芯线上感应出接近等量的反电势从而阻止芯线中电流流向电机，使绝大部分电流如同高频集肤效应那样从电缆外皮流，这样减小了流过避雷器(与芯线相连)的电流，也即限制了避雷器的动作电流。电缆芯中的反电势是建立在电缆外皮与电缆芯导线的耦合作用基础之上，为了加强这种耦合作用(以加强反电势)，常采取将70m段的接地引线平行架设在导线下方，并与电缆首端的金属外皮在装设FE2杆塔处连接在一起后接地，工频接地电阻不应大于5Ω。在电缆首端保留FE2以便在强雷时动作(即一般情况下不动作)以进一步限制避雷器动作电流(在强雷时也不超过3KA)。

7—7

变电站的防雷保护可分为直击雷的保护和雷电侵入波的保护两个方面。本题涉及对雷电侵入波的保护，具体措施就是装设避雷器，要确定避雷器装设在什么位置以及选择何种参数的避雷器。防雷保护方案如下：

1.母线上装设避雷器。220KV、110KV双母线的每条母线以及10KV母线对地分别装设一组(三相)避雷器。如选用阀式避雷器则为FZ—220，FZ—110，FZ—10。根据避雷器至变压器及其它电气设备最大允许电气距离校验避雷器安装位置是否妥当。由于避雷器电气参数不同时，最大允许电气距离也不同，以下以选用阀式避雷器为例计算最大允许电气距离。

220KV

保护进线段长度为2Km，根据表7—5得

α′=1.2KV/m。查表7—3得Uc.5=664KV，Uj=949KV。根据Uc.5+2α＇L≤Uj可算出避雷器至变压器最大允许电气距离L=118m。

110KV

保护进线段长度为1Km或2Km，根据表7—5得α′=1.5KV/m或α′=0.75KV/m。查表7—3得Uc.5=332KV，Uj=478KV。根据Uc.5+2α＇L≤Uj，可算出避雷器至变压器最大允许电气距离分别为48m和97m。但此距离为一路出线的情况，对于此题为至少为二路出线，故最大允许电气距离还要增大，查图7—11可得最大允许电气距离为70m和135m。

2.主变T1中性点装设避雷器。T2为Y0/Δ联接，而T1为Y/Δ联接，故T1中性点对地应装设一只避雷器。如选用阀式避雷器则选FZ—35。

3.自耦式主变T2装设避雷器。由于运行方式可能出现中压侧开路和高压侧开路的运行方式，因此相应母线上的避雷器由于绕组出口处断路器的分闸而对开路的中压、高压绕组起不到保护作用，为此应在中压绕组(110KV)和高压绕组(220KV)出口处(绕组出口断路器的绕组侧)分别装设一组避雷器。若选用阀式避雷器则分别为FZ—110和FZ—220。

4.110、220线路的进线段保护

进线段的长度：220KV为2Km，110KV根据最大允许电气距离校核结果而定。

进线段的耐雷水平：110KV为75KA，220KV为120KA

进线段避雷线的保护角：＜20°

进线段末端是否装排气式(或阀式代替)避雷器，要视线路另一端是否有电源而定，因运行方式(四路/两路，三路/一路)已表明雷季可能出现线路末端可能处于开路状态。

第八章

8—1

暂时过电压与操作过电压产生的根本性原因是完全不同的，前者由于参数特定的配合引起，因此只要这种参数配合不发生改变，过电压就可能持续。后者为电网中发生振荡型的暂态过程引起，一旦暂态过程结束，过电压也就消失。

8—2

工频过电压也称工频电压升高，因为此类过电压表现为工频电压下的幅值升高。引起工频电压升高的原因有：空载线路的电容效应、不对称短路和突然甩负荷。

空载线路可看作由分布的L、C回路构成，在工频电压作用下，线路的总容抗一般远大于导线的感抗，因此由于电容效应使线路各点电压均高于线路首端电压，而且愈往线路末端，电压愈高。系统发生不对称短路时，短路电流的零序分量会使健全相电压升高，而在不对称短路中以单相接地最为常见且引起健全相上电压升高也最为严重。由于某种原因线路突然甩负荷，作为电源的发电机，根据磁链守恒原理，通过激磁绕组的磁通来不及变化，与其相应的电源电势Ed′维持原来数值从而使线路上工频电压升高。

8—3

影响空载线路电容效应引起工频电压升高的因素主要有3个。其一是线路的长度。线路越长，空载线路末端比首端电压升高越大，可采用

进行计算。其二是电源容量。电源容量越大，电源电抗XS越小，电压升高越小。另外，也与线路是否接有并联电抗器有关。线路接入并联电抗器后，通过补偿空载线路的电容性电流削弱电容效应从而达到降低工频电压升高的目的。

第九章

9—1

操作过电压

产

生

原

因

影

响

因

素

电弧接地过电压

中性点不接地系统中由于出现间歇性电弧接地引起振荡型暂态过程

1.接地电容电流大小(如中性点接消弧线圈后可减小)

2.系统相关参数(相间电容和损耗)

3.电弧熄灭和重燃时的相位(此因素具有随机性而不可控)

空载线路分闸过电压

分闸后断路器触头间由于出现电弧重燃引起振荡型暂态过程

1.断路器灭弧性能。其直接影响到分闸后的重燃程度

2.接线方式(出线数以及是否接有电磁式电压互感器)。影响到在相同重燃情况下的过电压大小

3.中性点接地方式。中性点非有效接地系统中由于中性点电位的位移而使在相同情况下的过电压数值增大。

空载线路合闸过电压

合闸前后电路状态改变引起振荡型暂态过程

1.合闸前后电路状态的差异。这与合闸时的相位以及是计划性合闸还是重合闸有关。

2.线路残余电压大小。这主要影响重合闸过电压大小。

3.系统参数、结构、断路器合闸的三相同期性。

切除空载变压器过电压

切除过程中由于空载电流的突然“截断”引起磁场能量向电场能量的转变

1.断路器的灭弧性能

2.变压器的参数

9—2

消弧线圈是一有铁芯的电感线圈，接在系统中性点与地之间，消弧线圈的基本作用是补偿流过故障点的容性接地电流，使接地电弧容易熄灭，同时消弧线圈能降低故障相上恢复电压的上升速度，减小电弧重燃的可能性，这样接地电弧出现后会很快熄灭且不重燃，从而限制了间歇电弧接地过电压。消弧线圈电感电流能补偿系统对地电容电流的百分数称为消弧线圈的补偿度。根据补偿度的不同，可选择消弧线圈参数使系统处于欠补偿、全补偿、过补偿状态下运行。为了充分发挥消弧线圈的消弧作用(若欠补偿，则随电网发展使补偿度更低)以及避免出现或接近全补偿(若欠补偿，运行时由于部分线路退出而成为全补偿)后因三相对地电容不对称导致中性点上出现较大的位移电压危及绝缘，所以常采用过补偿运行方式来选择消弧线圈参数。

9—3

空载线路分闸过电压是由于断路器分闸后触头间发生电弧重燃而引起的，所以断路器灭弧性能好，重燃次数少或基本不重燃，分闸过电压就较低。而切除空载变压器过电压是由于断路器分闸时发生空载电流的突然“截断”(从某一数值突然降至零)，所以断路器灭弧性能好，空载电流“截断”值大，截断电流对应的磁场能量大，截流后转变成电场能量也大，切除空载变压器过电压就高。

9—4

带并联电阻断路器具有主辅两对触头，在主触头上并有电阻，所以称为并联电阻(如书P185上图9—7所示)。空载线路分闸时，主触头S1先分，此时线路仍未从电源切除，S1分闸也会引起振荡的暂态过程，由于S1断口间恢复电压仅为并联电阻的电压降，这要小于电源电压，所以S1分闸后不易发生电弧重燃。S1分闸后经1.5～2个工频周期，辅助触头S2分闸，线路真正从电源切除，S2分闸后触头间恢复电压也要小于电源电压所以也不容易发生电弧的重燃，这样空载线路分闸过程中都不易发生电弧重燃，当然分闸过电压也降低。空载线路合闸时，辅助触头S2先合闸，线路变成串以并联电阻后的合闸，由于电阻的阻尼作用，S2合闸过程中的过电压降低。经1.5～2个工频周期，主触头S1闭合，线路真正合闸电源，S1闭合仅将R短接掉，此过程中状态的改变要小于直接合闸电源时的状态改变，所以S1闭合过程中过电压也降低。

9—5

切除空载变压器过电压的限制措施主要是采用避雷器，由于切空变过电压虽幅值较高但其持续时间短，能量小，故可采用阀式避雷器(当然也可用氧化锌避雷器)加以限制，此种过电压也是阀式避雷器所能限制的唯一操作过电压。对于切合空载线路过电压，避雷器不是主要限制措施(主要措施是断路器并电阻)，因为这种操作非常频繁，若采用避雷器限制过电压，会使避雷器动作过于频繁。另外即使作为辅助限制措施，也应选用通流能力较大的氧化锌避雷器。对于电弧接地过电压一般不采用避雷器限制而主要采用接消弧线圈的措施。当然，为保护中性点绝缘和消弧线圈，中性点对地可接避雷器。

第十章

10—1

铁磁谐振过电压是在铁磁谐振过程中出现的。要发生铁磁谐振须满足两个条件：一是谐振回路中须存在非线性的电感(具有铁芯的电感)和线性电容，且正常运行时感抗应大于容抗。二是须由外界因素(如电源电势的扰动)强烈的激发，使谐振回路稳定于谐振工作点。铁磁谐振与线性谐振相比较，具有不同的谐振条件与特点：

1.线性谐振条件是无需激发；而铁磁谐振条件

(L0为正常非饱和时的电感)以及外界一定程度的激发，二个条件缺一不可。

2.线性谐振时，谐振回路的电流呈阻性，uL=uC；而铁磁谐振时，谐振回路的电流呈容性，uL＜uC，即发生铁磁谐振时非稳定工作点)。

3.线性谐振时，回路有固定的自振频率而铁磁谐振时回路无固

定的自振频率，可发生基波与各种频率谐波的谐振。

10—2

在中性点不接地系统中常出现由于电磁式电压互感器饱和引起的铁磁谐振过电压。电磁式电压互感器常接成Y0，如书P198上图10—7所示。正常运行时，电磁式电压互感器各相感抗大于线路容抗，导致并联后呈容性。当系统中出现某些扰动，使电压互感器各相饱和程度不同，饱和程度小的相仍呈容性，饱和程度大的相可能呈现感性，若参数配合不当恰好使总导纳接近于零，就发生串联谐振。由于谐振使中性点位移电压(正常时为零)急剧上升。而中性点电位升高后，三相导线的对地电位等于各相电源电势与中性点位移电压的相量和。若发生基波谐振，则往往一相对地电压降低，二相对地电压升高。为限制这种铁磁谐振过电压可选用励磁特性较好的电磁式电压互感器；可加并对地电容以增大三相对地电容来避免出现某些相从容性变为感性，以消除与呈容性相构成谐振的可能性；也可在电压互感器开口三角形绕组中短时接入阻尼电阻或在电压互感器一次绕组中性点对地接入电阻以阻尼振荡降低过电压。

10—3

断线过电压是由于断线而引起的铁磁谐振过电压。这里所说的断线包括导线因故障的折断，也包括断路器非全相操作以及熔断器的一相或二相熔断等。断线过电压一般发生于线路末端接有中性点不接地的空载或轻载变压器。断线后，系统处于非全相运行，在上述情况下会形成如书P196上图10—6所示的简化等值串联谐振电路。无论是一相断线还是二相断线，电路中的L都为空载或轻载变压器单相励磁电感的1.5倍，而电路中的E和C则根据断线的位置，一相断线还是二相断线以及电源中性点接地与否而不同，详见书P197上表10—1。要

产生断线过电压需满足这一条件，且须在外界因素激发下才有可

能发生铁磁谐振，产生断线过电压。为限制和消除这种过电压，措施之一是避免出现非全相运行，如加强巡视和检修预防线路发生断线或保证断路器三相同期动作以避免发生一相或二相拒动，以及不采用熔断器等。措施之二是在中性点接地系统中操作中性点不接地的变压器时，将变压器中性点临时接地。

第十一章

11—1

绝缘配合就是要协调配合好电力系统中的过电压、限压措施与电气设备绝缘水平三者之间的关系，使之在经济上、技术上、运行上都能接受。电气设备的绝缘水平是设备绝缘应能耐受(不发生闪络、击穿或其它损坏)的电压，也即耐压试验时的试验电压。电气设备对于工频交流、雷电冲击和操作冲击电压的绝缘水平或耐压试验电压是不同的。

11—2

线路绝缘子串中绝缘子的片数首先按工作电压下满足所要求的泄漏距离(按泄漏比距计算)来确定，然后再按内、外过电压下的要求进行校验(若不满足需增加片数)。

11—3

电气设备绝缘的BIL称为电气设备的基本冲击绝缘水平，它表征电气设备绝缘耐受雷电过电压的能力。电气设备绝缘的SIL称为电气设备的操作冲击绝缘水平，它表征电气设备绝缘耐受操作冲击过电压的能力。

本文档由站牛网zhann.net收集整理，更多优质范文文档请移步zhann.net站内查找