
高电压技术知识

第一篇 电介质的电气强度

第 1 章 气体的绝缘特性与介质的电气强度

1、气体中带电质点产生的方式

热电离、光电离、碰撞电离、表面电离

2、气体中带电质点消失的方式

流入电极、逸出气体空间、复合

3、电子崩与汤逊理论

电子崩的形成、汤逊理论的基本过程及适用范围

4、巴申定律及其适用范围

击穿电压与气体相对密度和极间距离乘积之间的关系。两者乘积大于 0.26cm

时,不再适用

5、流注理论

考虑了空间电荷对原有电场的影响和空间光电离的作用，适用两者乘积大于

0.26cm 时的情况

6、均匀电场与不均匀电场的划分

以最大场强与平均场强之比来划分。

7、极不均匀电场中的电晕放电

电晕放电的过程、起始场强、放电的极性效应

8、冲击电压作用下气隙的击穿特性

雷电和操作过电压波的波形

冲击电压作用下的放电延时与伏秒特性

50%击穿电压的概念

9、电场形式对放电电压的影响

均匀电场无极性效应、各类电压形式放电电压基本相同、分散性小

极不均匀电场中极间距离为主要影响因素、极性效应明显。

10、电压波形对放电电压的影响

电压波形对均匀和稍不均匀电场影响不大

对极不均匀电场影响相当大

完全对称的极不均匀场：棒棒间隙

极大不对称的极不均匀场：棒板间隙

11、气体的状态对放电电压的影响

湿度、密度、海拔高度的影响

12、气体的性质对放电电压的影响

在间隙中加入高电强度气体,可大大提高击穿电压，主要指 一些含卤族元素的强

电负性气体，如 SF₆

13、提高气体放电电压的措施

电极形状的改进

空间电荷对原电场的畸变作用

极不均匀场中屏障的采用

提高气体压力的作用

高真空

高电气强度气体 SF₆ 的采用

第 2 章 液体和固体介质的绝缘的电气强度

1、电介质的极化

极化：

在电场的作用下，电荷质点会沿电场方向产生有限的位移现象，并产生电矩

(偶极矩)。

介电常数：

电介质极化的强弱可用介电常数的大小来表示，与电介质分子的极性强弱有关。

极性电介质和非极性电介质：

具有极性分子的电介质称为极性电介质。

由中性分子构成的电介质。

极化的基本形式

电子式、离子式 (不产生能量损失)

转向、夹层介质界面极化 (有能量损失)

2、电介质的电导

泄漏电流和绝缘电阻

气体的电导：

主要来自于外界射线使分子发生电离和强电场作用下气体电子的碰撞电离

液体的电导：

离子电导和电泳电导

固体的电导：

离子电导和电子电导

3、电介质的损耗

介质损耗针对的是交流电压作用下介质的有功功率损耗

电介质的并联与串联等效回路

介质损耗一般用介损角的正切值来表示

气体、液体和固体电介质的损耗

液体电介质损耗和温度、频率之间的关系

4、液体电介质的击穿

纯净液体介质的电击穿理论

纯净液体介质的气泡击穿理论

工程用变压器油的击穿理论

5、影响液体电介质击穿的因素

油品质、温度、电压作用时间、电场均匀程度、压力

6、提高液体电介质击穿电压的措施

提高油品质，采用覆盖、绝缘层、极屏障等措施

7、固体电介质的击穿

电击穿、热击穿、电化学击穿的击穿机理及特点

8、影响固体电介质击穿电压的主要因素

电压作用时间 温度 电场均匀程度

受潮 累积效应 机械负荷

9、组合绝缘的电气强度

“油-屏障”式绝缘

油纸绝缘

第二篇 电气设备绝缘试验

第 3 章 绝缘的预防性试验

1、绝缘电阻与吸收比的测量

用兆欧表来测量电气设备的绝缘电阻

吸收比 K 定义为加压 60s 时的绝缘电阻与 15s 时的绝缘电阻比值。

K 恒大于 1，且越大表示绝缘性能越好。

大容量电气设备中，吸收现象延续很长时间，吸收比不能很好地反映绝缘的真实

状态，可用极化指数再判断。

测量绝缘电阻能有效地发现总体绝缘质量欠佳；绝缘受潮；两极间有贯穿性的导电通道；绝缘表面情况不良。

2、泄漏电流的测量

测量泄漏电流从原理上来说，与测量绝缘电阻是相似的，能发现一些尚未完全贯通的集中性缺陷，原因在于：

在试品上的直流电压要比兆欧表的工作电压高得多，故能发现兆欧表所不能发现的某些缺陷

加在试品上的直流电压是逐渐增大的，可以在升压过程中监视泄漏电流的增长动向。

3、介质损耗角正切的测量

$\tan \delta$ 能反映绝缘的整体性缺陷(例如全面老化)和小电容试品中的严重局部性缺陷。根据 $\tan \delta$ 随电压而变化的曲线，可判断绝缘是否受潮、含有气泡及老化的程度。

西林电桥法测量的基本原理影响西林电桥测量的因素

外界电磁场的干扰

温度的影响

试验电压的影响

试品电容量的影响

试品表面泄漏的影响

4、局部放电的测量

局部放电：

高压电气设备的绝缘内部总是存在一些缺陷,如气泡空隙、杂质等。由于这些异物的电导和介电常数不同于绝缘物，故在外加电场作用下，这些异物附近将具有比周围更高的场强，有可能引起该处物质产生电离放电现象，称为局部放电。

局部放电的影响：

放电产生的带电粒子不断撞击绝缘，有可能破坏绝缘高分子的结构，造成裂解

放电能量产生的热能使绝缘内部温度升高而引起热裂解

在局部放电区，强烈的离子复合会产生高能辐射线，引起材料分解，例如使高分子材料的分子结构断裂

气隙中如含有氧和氮，放电可产生臭氧和硝酸等强烈的氧化剂和腐蚀剂，使纤维

树脂、浸渍剂等材料发生化学破坏

局部放电的测量方法

当电气设备内部绝缘发生局部放电时 ,将伴随着出现许多现象。有些属于电的 ,例如电脉冲、介质损耗的增大和电磁波辐射 ,有些属于非电的 ,如光、热、噪音、气体压力的变化和化学变化。这些现象都可以用来判断局部放电是否存在 ,因此检测的方法也可以分为电的和非电的两类。

目前得到广泛应用而且比较成功的方法是电的方法 ,即测量绝缘中的气隙发生放电时的电脉冲。它不仅可以判断局部放电的有无 ,还可以判定放电的强弱。

表征局部放电的三个基本参数

视在放电量

$$q \approx C_a \Delta U_a$$

其中 C_a 为试品电容 , ΔU_a 为气隙放电时 , 试品两端的压降。

既是发生局部放电时试品 C_a 所放掉的电荷 , 也是电容 C_b 上的电荷增量。

放电重复率 (N)

在选定的时间间隔内测得的每秒发生放电脉冲的平均次数

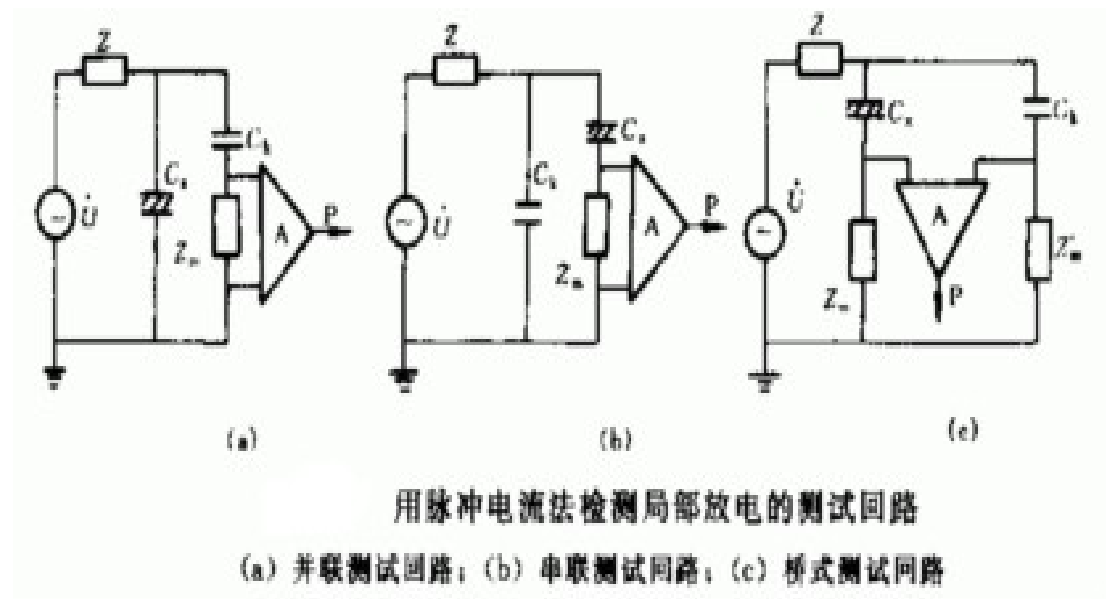
放电能量 (W)

指一次局部放电所消耗的能量。

$$W=1/2*qU_i$$

其中 q 为视在放电量， U_i 为局部放电起始电压。

局部放电测量的脉冲电流法



三种回路的基本目的都是使在一定电压作用下的被试品中产生的局部放电电流

脉冲流过检测阻抗，然后把检测阻抗上的电压或电压差（桥式）加以放大后送到

检测仪器 P （示波器、峰值电压表、脉冲计数器）中。

所测得的脉冲电压峰值与试品的视在放电量成正比，经过适当的校准，就能直接读出视在放电量（ pC ）。

局部放电测量的非电检测法

➤ 噪声检测法

➤ 光检测法

5 电压分布的测量

- 在工作电压的作用下，沿着绝缘结构的表面会有一定的电压分布。
- 表面比较清洁时，其分布规律取决于绝缘结构本身的电容和杂散电容
- 表面染污受潮时，分布规律取决于表面电导。
- 通过测量绝缘表面上的电压分布亦能发现某些绝缘缺陷。
- 测量电压分布最适用于那些由一系列元件串联组成的绝缘结构。(悬式绝缘子串，支柱绝缘子柱)

6 绝缘状态的综合判断

- 绝缘预防性试验中的种种非破坏试验项目 ,对揭示绝缘中的缺陷和掌握绝缘性能的变化趋势，各具有一定的功能，也各有自己的局限性。
- 同一项目用于不同设备时的效果也不尽相同。
- 不能孤立地根据某一项试验结果对绝缘状态下结论 ,必须将各项试验结果联系起来综合分析，并考虑被试品的特点和特殊要求，方能作出正确的判断

-
- 若某一试品的各项试验均顺利通过，一般可认为绝缘状态良好。

三比较方法

若个别试验项目不合格，达不到规程的要求，可使用三比较方法。

- 与同类型设备作比较

同类型设备在同样条件下所得的试验结果应该大致相同,若差别很大就可能存

在问题

- 在同一设备的三相试验结果之间进行比较

若有一相结果相差达 50%以上,该相很可能存在缺陷

- 与该设备技术档案中的历年试验数据进行比较

若性能指标有明显下降情况,即可能出现新的缺陷

第 4 章 电气绝缘高电压试验

绝缘的高电压试验

在高压试验室用工频交流高压、直流高压、雷电冲击高压、操作冲击高压等模

拟电气设备的绝缘在运行中受到的工作电压 ,用以考验各种绝缘耐受这些高电压

作用的能力。

特点

-
- 具有破坏性试验的性质。
 - 一般放在非破坏性试验项目合格通过之后 进行，以避免或减少不必要的损失。

1 工频高电压试验

- 工频高电压试验不仅仅为了检验绝缘在工频交流工作电压下的性能 ,也用
来等效地检验绝缘对操作过电压和雷电过电压地耐受能力。
- 在试验中可能会导致绝缘内部的累积效应,在一定程度上损伤绝缘
- 试验电压数值的确定是关键,过高对设备绝缘造成损伤大,考核过于严格;
过低不足以发现设备缺陷

工频高电压的产生

- 通常采用高压试验变压器或其串级装置来产生。
- 对电缆、电容器等电容量较大的被试品 ,可采用串联谐振回路来获得试验
用的工频高电压。
- 工频高压装置是高压试验室中最基本的设备 ,也是产生其他类型高电压的
设备基础部件。

高压试验变压器的特点

-
- 试验变压器本身应有很好的绝缘，但绝缘裕度小，试验过程中要严格限制过电压。

- 试验变压器容量一般不大
- 外观上的特点：油箱本体不大而其高压套管又长又大。
- 试验变压器与连续运行时间不长，发热较轻，因而不需要复杂的冷却系统
- 漏抗大，短路电流较小，可降低机械强度方面的要求,节省制造费用。
- 输出电压波形很难做到是正负半波对称的正弦波形，需要采取措施加以修正。

试验变压器串级装置

- 变压器的体积和重量近似地与其额定电压的三次方成比例。
- 随着体积和重量的增加，试验变压器的绝缘难度和制造价格增加得更多。
- 电压超过 1000kV 时，需采用若干台试验变压器组成串级装置来满足要求。

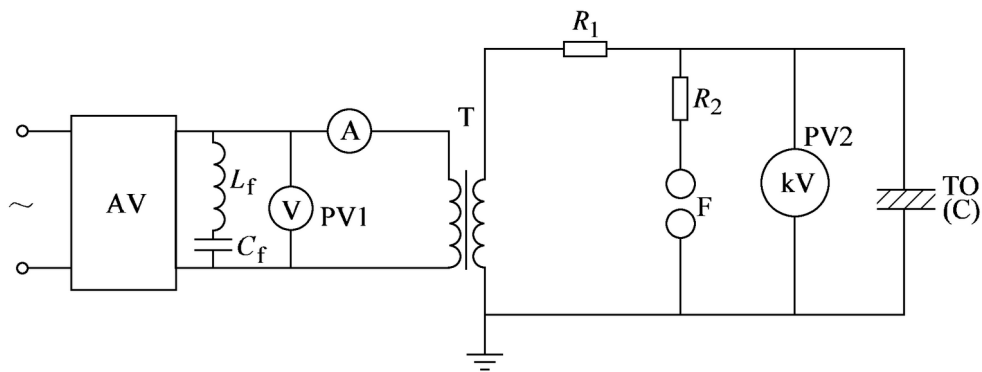
绝缘的工频耐压试验

- 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。

- 工频耐压试验可用来确定电气设备绝缘耐受电压的水平 ,判断电气设备能否继续运行 , 是避免其在运行中发生绝缘事故的重要手段。
- 工频耐压试验时 ,对电气设备绝缘施加比工作电压高得多的试验电压 ,这些试验电压反映了电气设备的绝缘水平。

工频高压试验的基本接线图

以试验变压器或其串级装置作为主设备的工频高压试验(包括耐压试验)的基本接线如下图所示。试验变压器的输出电压必须能在很大的范围内均匀地加以调节 , 所以它的低压绕组应由一调压器来供电。



工频高压试验的基本接线图

AV — 调压器 PV_1 — 低压侧电压表 T — 工频高压装置

R_1 — 变压器保护电阻 TO — 被测试品 R_2 — 测量球隙保护电阻

PV_2 — 高压静电电压表 F — 测量球隙 Lf — Cf — 谐波滤波器

工频高压试验的实施方案

- 按规定的升压速度提升作用在被测试品 TO 上的电压，直到等于所需的试验电压 U 为止，这时开始计算时间。
- 为了让有缺陷的试品绝缘来得及发展局部放电或完全击穿，达到 U 后还要保持一段时间，一般取一分钟。
- 如果在此期间没有发现绝缘击穿或局部损伤（可通过声响、分解出气体、冒烟、电压表指针剧烈摆动、电流表指示急剧增大等异常现象作出判断）的情况，即可认为该试品的工频耐压试验合格通过。

2 直流高电压试验

- 被试品的电容量很大的场合（例如长电缆段、电力电容器等），用工频给交

的容量，很难做到。这时用直流高电压试验来代替工频高电压试验。

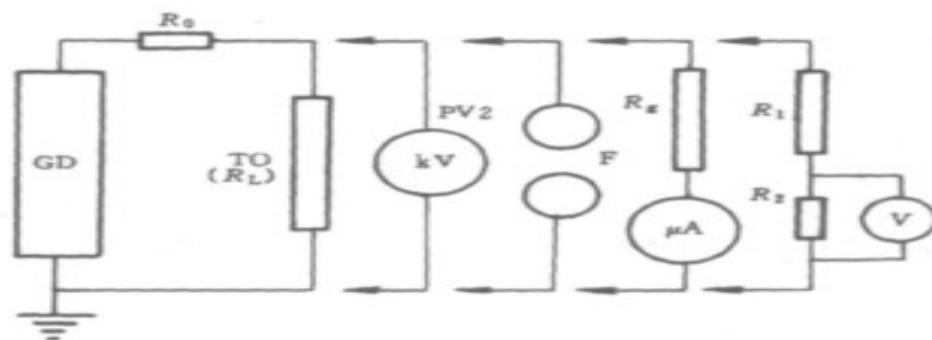
- 直流输电工程的增多促使直流高电压试验的广泛应用。
- 直流高电压在其他科技领域也有广泛的应用，其中包括静电喷漆、静电纺织、静电除尘、X射线发生器、等离子体加速以及原子核物理研究中都使用直流高压作为电源。

直流高电压的产生

- 将工频高电压经高压整流器而变换成直流高电压。
- 利用倍压整流原理制成的直流高压串级装置（或称串级直流高压发生器）

能产生出更高的直流试验电压

直流高压试验的基本接线



直流高压试验接线示意图
GD—直流高压发生器；TO—被试品

若高压静电电压表 PV2 量程不够,可改为球隙、高值电阻串接微安表或高阻值直接分压器来测量高压

直流高压试验的特点

最常见的直流高压试验为某些交流电气设备 (油纸绝缘高压电缆、电力电容器、旋转电机等) 的绝缘预防性试验。

和交流耐压试验相比主要有以下一些特点：

- 只有微安级泄漏电流，试验设备不需要供给试品的电容电流，试验设备的容量较小，可以做的很轻巧，便于现场试验。
- 试验时可同时测量泄漏电流，由所得得“电压 - 电流”曲线能有效地显示绝缘内部的集中性缺陷或受潮。
- 用于旋转电机时，能使电机定子绕组的端部绝缘也受到较高电压的作用，发现端部绝缘中的缺陷。
- 在直流高压下，局部放电较弱，不会加快有采购绝缘材料的分解或老化变质，一定程度具有非破坏性试验的性质。
- 直流电压下，绝缘内的电压分布由电导决定，因而与交流运行电压下的电压分布不同，所以交流电气设备的绝缘考验不如交流耐压试验那样接近

实际。

3 冲击高电压试验

- 研究电气设备在运行中遭受雷电过电压和操作过电压的作用时的绝缘性能。
- 许多高压试验室中都装设了冲击电压发生器 ,用来产生试验用的雷电冲击电压波和操作冲击电压波。
- 高压电气设备在出厂试验、型式试验时或大修后都必须进行冲击高压试验

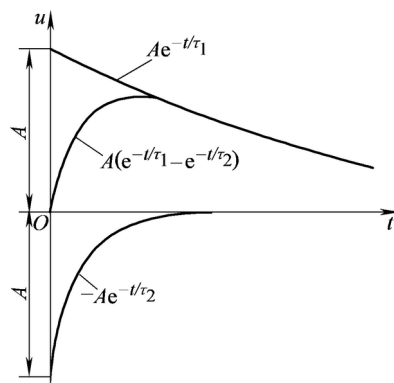
冲击高电压的产生

$$u(t) = A(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}})$$

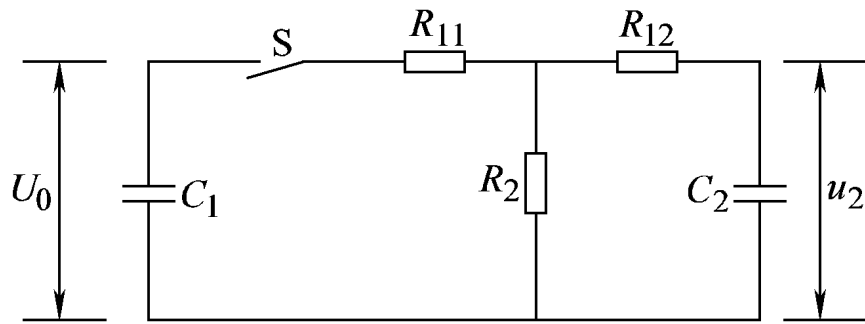
τ_1

——波尾时间常数

τ_2 ——波前时间常数



实际冲击电压发生器回路



R_{11} 为阻尼电阻

放电回路的利用系数

$$\eta = \frac{U_{2m}}{U_0} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} \times \frac{R_2}{R_{11} + R_2}$$

- 单级冲击电压发生器能产生的最高电压一般不超过 200 ~ 300kV。
- 因而采用多级叠加的方法来产生波形和幅值都能满足需要的冲击高电压波。

操作冲击试验电压的产生

额定电压大于 220kV 的超高压电气设备在出厂试验、型式试验中，不能象 220kV 及以下的高压电气设备那样以工频耐压试验来等效取代操作冲击耐压试验。

国家标准规定的标准波形为 250/2500us。应特别考虑以下两个问题：

- 为大大拉长波前，又使发生器的利用系数降低不是很多，需采用高效率回路。
- 需考虑充电电阻 R 对波形和发生器效率的影响

内绝缘冲击耐压试验

- 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。（1.2/50us 全波）。
- 对变压器和电抗器类设备的内绝缘，还要进行雷电冲击截波（1.2/2 ~ /2-5us）耐压试验，其对绕组绝缘（特别是纵绝缘）的考验往往更加严格。
- 内绝缘冲击全波耐压试验应在被试品上并联球隙，并将它的放电电压整定得比试验电压高 15% ~ 20%，防止试验过程中无意见出现的过高冲击电压而损坏产品。

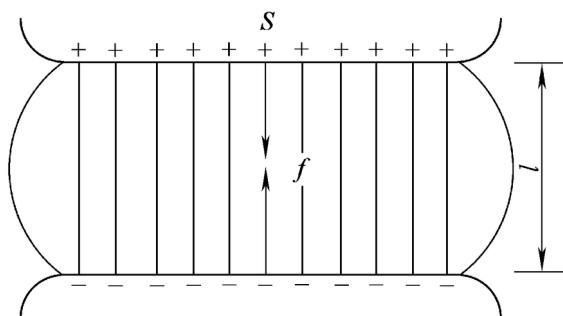
外绝缘冲击耐压试验

- 可采用 15 次冲击法，即对被测试品施加正、负极性冲击全波试验电压各 16 次，相邻两次冲击的时间间隔应不小于 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、外绝缘的操作冲击高压试验的方法与雷电冲击全波试验完全相同。

4 高电压的测量技术

- 高电压试验除了要有产生各种试验电压的高压设备，还必须要有能测量这些高电压的仪器和设备。
- 电力系统中，广泛应用电压互感器配上低电压表来测量高电压；但此法在试验室中用得很少。试验室条件下广泛应用高压静电电压表、峰值电压表、球隙测压器、高压分压器等仪器测量高电压。
- 国标规定，高电压的测量误差一般应控制在 $\pm 3\%$ 以内。

高压静电电压表的工作原理



两个特制的电极间加上电压 U ,电极间就会受到静电力 f 的作用 ,而且 f 的大小与 U 的数值有固定关系 ,设法测量 f 的大小就确定所加电压 U 的大小。利用这一原理制成的仪表即为静电电压表 ,它可以用来测量低电压 ,也可以在高压测量中得到应用。

静电电压表的典型特点

- 电场作用力与电压平方成正比 ,所以它的偏转方向与被测电压的极性无关
- 静电电压表测交流时为其电压有效值,测带脉动的直流时近似为其平均值。
- 静电电压表不能用于测量冲击电压。
- 静电电压表的内阻很高 , 在测量时几乎不会改变被测试样上的电压
- 大气中工作的高压静电电压表量程上限在 50-250kV; SF_6 气体中可达

500-600kV。更高的电压需配合分压器使用

峰值电压表

峰值电压表的制成原理通常有两种，一种是利用整流电容电流测量，另一种是利用整流充电电压测量。

峰值电压表可分为交流峰值电压表和冲击峰值电压表。

注意事项：

- 选用冲击峰值电压表时，要注意其响应时间是否合适于被测波形的要求，并应使其输入阻抗尽可能大。
- 利用峰值电压表，可直接读出冲击电压的峰值，与用球隙测压器测峰值相比，可大大简化测量过程。
- 被测电压波形必须是平滑上升的，否则就会产生误差。
- 指示仪表可以是指针式表计，也可以是具有存储功能的数字式电压表。

球隙测压器

- 测量球隙由一对相同直径的金属球构成，测量误差 2%-3%，满足大多数工程测试的要求。
- 当球隙距离 d 与直径 D 之比不大时，球隙间的电场为稍不均匀电场，其击穿电压决定于球隙间的距离。

-
- 能直接测量高达数兆伏的各类高电压峰值。

球隙的优点

- 击穿时延小，放电电压分散性小，具有比较稳定的放电电压值和较

高的测量精度

- 50%冲击放电电压与静态(交流或直流)放电电压的幅值几乎相等
- 由于湿度对稍不均匀场的影响较小，可不必对湿度进行校正。

球隙测量的注意事项

- 用球隙测量冲击电压时，应通过调节极距来达到 50%放电概率，此时被测电压即等于球隙在这一距离时的 50%冲击放电电压。
- 确定 50%的放电概率常用 10 次加压法，即对球隙加上 10 次同样的冲击电压，如有 4~6 次发生了放电，即可认为已达到 50%放电概率。

高压分压器

被测电压很高时，采用高压分压器来分出一小部分电压，然后利用静电电压

表、峰值电压表、高压示波器等来测量。

对分压器的技术要求

- 要求分压比具有一定的准确度和稳定性(幅值误差要小);

每一个分压器均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，总电压与该低电压之比称为分压比 K

- 分出的电压与被测高电压波形的相似性 (波形畸变要小);

实际的电容分压器

分布式电容分压器

高压臂由多个电容器元件串联组装而成，要求每个元件尽可能为纯电容，介质损耗和电感尽可能小

集中式电容分压器

高压臂仅使用一只气体绝缘高压标准电容器，气体介质常采用 N_2, CO_2, SF_6 及其混合气体，目前我国已能生产 1200kV 的高压标准电容器。

- 静电电压表可测交流和直流,但不能测冲击电压。
- 峰值电压表可用来测交流电压和冲击电压峰值。
- 球隙可用来测高达数兆伏的交流、冲击峰值和直流电压。
- 电压特别高时，需配合分压器使用。直流高压测量只能使用电阻分压器。

交流和冲击高压可使用电阻、电容和阻容分压器。

第 5 章 电气绝缘在线检测

离线检测的缺点

离线电气绝缘预防性试验和高电压试验具有如下缺点：

- 需要停电进行，而不少重要的电力设备不能轻易地停止运行；
- 检测间隔周期较长，不能及时发现绝缘故障；
- 停电后的设备状态与运行时的设备状态不相符，影响诊断的正确性。

在线检测的优点

- 在线检测是在电力设备运行的状态下连续或周期性检测绝缘的状况，可避免以上缺点；
- 建立电气绝缘在线检测系统也是实施电力设备状态维修和建设无人值守变电站的基础。

在线检测和状态维修带来的经济效益是十分显著的。

1 变压器油中溶解气体的检测

- 绝缘故障与油中溶解气体
 - 过热故障
 - 放电故障

-
- 绝缘受潮
 - 油中溶解气体的在线监测
 - 脱气
 - 混合气体分离
 - 气体检测
 - 油中气体分析与故障诊断
 - 特征气体法
 - 三比值法

2 局部放电的在线监测系统

- 局部放电的在线检测分为电测法和非电测法两大类。
- 电测法中的脉冲电流法是离线条件下测量电气设备局部放电的基本方法，也是目前在局部放电在线检测的主要手段，其优点是灵敏度高。
- 电测法的缺点是由于现场存在着严重的电磁干扰，将大大降低检测灵敏度和信噪比。

变压器的局部放电情况

- 变压器绝缘体系中的放电类型很多，不同的放电类型对绝缘的破坏作用有

很大差异，因此有必要对各种放电类型加以区分。

- 变压器绝缘结构中发生的局部放电类型主要有五种：油中尖板放电、纸或纸板内部放电、油中气泡放电、纸或纸板沿面放电和悬浮放电。
- 模式识别结果的正确与否关键在于放电信号特征的提取。

3 介质损耗角正切的检测

➤ 高压电桥法

- 原理
- 优点
- 缺点

➤ 相位差法

- 原理
- 误差

➤ 全数字测量法

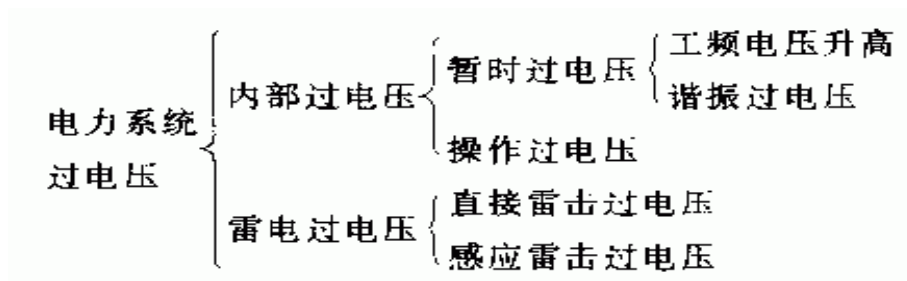
第三篇 过电压防护与绝缘配合

第六章 过电压的概念与分类

- 过电压的概念：指电力系统中出现的对绝缘有危险的电压升高和电位差升

高。

- 过电压的分类：



第 6 章 输电线路和绕组中的波过程

1 无损耗单导线上的波过程

- 波传播的物理概念：电压波和电流波沿线路的传播过程实质

上就是电磁波沿线路传播的过程。

- 波动方程解，波速和波阻抗计算

- 线路中传播的任意波形的电压和电流传播的前行波和反方

向传播的反行波，满足算术叠加定理。

2 行波的折射和反射

- 线路末端的折射、反射

- 末端开路反射，在反射波所到之处电压提高 1 倍，而电流降为 0。

- 末端短路反射在反射波所到之处电流提高 1 倍，而电压降为 0。

-
- o 末端接集中负载时的折反射当 R 和 z_1 不相等时，来波将在集中负载上发生折反射。

➤ 集中参数等效电路(彼德逊法则)

波的多次折射、反射

3 行波通过串联电感和并联电容

- 电感使折射波波头陡度降低
 - 由于电感电流不能突变，因此当波作用在电感初瞬，电感相当于开路，它将波完全反射回去，此时折射波为 0，此后折射波电压随折射波电流增加而增加
- 电容使折射波波头陡度降低
 - 由于电容电压不能突变，波通过电容初瞬，电容相当于短路
- 电压波穿过电感和旁过电容时折射波波头陡度都降低，但由它们各自产生的电压反射波却完全相反
- 波穿过电感初瞬，在电感前发生电压正的全反射，使电感前电压提高 1 倍
- 波旁过电容初瞬，则在电容前发生电压负的全反射，使电容前的电压下降为 0

-
- 由于反射波会使电感前电压提高，可能危及绝缘，所以常用并联电容降低

波陡度

4 波在多导线系统中的传播

- 自波阻抗、互波阻抗的概念
- 多导线中电压、电流之间的关系方程
- 耦合系数的重要概念

5 波在传播中的衰减与畸变

- 线路电阻和绝缘电导的影响
- 冲击电晕的影响

线路参数满足下列条件时,波在线路中传播只有衰减，不会变形

$$\frac{R_0}{G_0} = \frac{L_0}{C_0}$$

原因在于：波在传播过程中每单位长度线路上的磁能和电能之比，恰好等于电流

波在导线电阻上的热损耗和电压波在线路电导上的热损耗之比，即

$$\frac{\frac{1}{2}L_0 i^2}{\frac{1}{2}C_0 u^2} = \frac{R_0 i^2 t}{G_0 u^2 t}$$

电阻 R_0 和电导 G_0 的存在不致引起波传播过程中电能与磁能的相互交换，电磁波只是逐渐衰减而不至于变形。

冲击电晕的影响

- 形成的电晕套使导线有效半径增大，对地电容增大，因此自波阻抗减小；
- 轴向导电性能较差，电流基本上在导体内流动，线路电感参数不变
互波阻抗不变
- 导线对地电容增大，电感不变，从而使波速减小
- 多导线间耦合系数增大
- 使行波衰减和变形

6 绕组中的波过程

- 变压器在雷电冲击波作用瞬间，可等值为一个电容，称为入口电容
- 在末端接地的单相绕组中，最大电压将出现在绕组首端附近，其值可达

1.4U₀

- 在末端不接地的单相绕组中，最大电压将出现在中性点附近，其值可达

1.9U₀

- 通过在绕组首端部位加一些电容环和电容匝以及增大纵向电容可降低电

位梯度

- 三相变压器多相进波时的最大电位
- 变压器绕组之间的波过程通过静电耦合和电磁耦合传递
- 旋转电机匝间绝缘上的电压与入侵波陡度成正比

第7章 雷电过电压及期防护

研究雷电过电压的必要性：

雷电现象极为频繁，产生的雷电过电压可达数千 kV，足以使电气设备绝缘发

生闪络和损坏，引起停电事故。

- 有必要理解雷电产生的原因、过程及参数，以理解防雷原理及设计防雷设备。

- 有必要对输电线路、发电厂和变电所的电气装置的采取防雷保护措施。

1 雷电放电和雷电过电压

➤ 雷电的放电过程：

先导放电阶段 主放电阶段 余辉放电阶段

➤ 主要的雷电参数有：

雷暴日及雷暴小时、地面落雷密度、主放电通道波阻抗、雷电流极性、雷电流幅值、雷电流等值波形、雷电流陡度等。

➤ 雷电过电压的形成

- 直击雷过电压
- 感应雷过电压

2 防雷保护设备

目前人们主要是设法去躲避和限制雷电的破坏性，基本措施就是加装避雷针、避雷线、避雷器、防雷接地、电抗线圈、电容器组、消弧线圈、自动重合闸等防雷保护装置。

- 避雷针、避雷线用于防止直击雷过电压
- 避雷器用于防止沿输电线路侵入变电所的感应雷过电压。

避雷针防雷原理及保护范围

- 避雷针是明显高出被保护物体的金属支柱，其针头采用圆钢或钢管制成

-
- 作用是吸引雷电击于自身，并将雷电流迅速泄入大地，从而使被保护物体免遭直接雷击。
 - 避雷针需有足够截面的接地引下线和良好的接地装置，以便将雷电流安全可靠地引入大地。
 - 单根和双根等高避雷针的保护范围

避雷线（地线）防雷原理及保护范围

- 避雷线的防雷原理与避雷针相同，主要用于输电线路的保护
- 可用来保护发电厂和变电所，近年来许多国家采用避雷线保护 500kV 大型超高压变电所。
- 用于输电线路时，避雷线除了防止雷电直击导线外，同时还有分流作用，以减少流经杆塔入地的雷电流从而降低塔顶电位
- 避雷线对导线的耦合作用还可以降低导线上的感应雷过电压。
- 单根及双根避雷线的保护原理

避雷器工作原理及常用种类

- 避雷针(线)不能完全避免设备不受雷击;从输电线路上也可能有危及设备绝缘的过电压波传入发电厂和变电所。

-
- 避雷器实质上是一种过电压限制器，与被保护的电气设备并联连接，当过电压出现并超过避雷器的放电电压时，避雷器先放电，从而限制了过电压的发展，使电气设备免遭过电压损坏。
 - 避雷器的常用类型有：保护间隙、管型避雷器、阀式避雷器和金属氧化物避雷器。

对避雷器的基本要求

- 绝缘强度的合理配合

避雷器与被保护设备的伏秒特性应有合理的配合。在绝缘强度的配合中，要求避雷器的伏秒特性比较平直、分散性小。

- 绝缘强度的自恢复能力

避雷器一旦在冲击电压作用下放电，就造成对地短路。随之工频短路电流（工频续流）要流过此间隙，避雷器应当具有自行截断工频续流，恢复绝缘强度的能力，使电力系统得以继续正常工作

- 各种避雷器的保护原理及优缺点
- 阀式避雷器和氧化锌避雷器的技术指标

3 输电线路的防雷保护

-
- 在整个电力系统的防雷中，输电线路的防雷问题最为突出。
 - 雷击线路时,自线路入侵变电所的雷电所也威胁设备安全。
 - 输电线路上的雷电过电压可分为直击雷过电压和感应雷过电压两种

输电线路落雷次数:

每 100km 线路每年的雷击次数

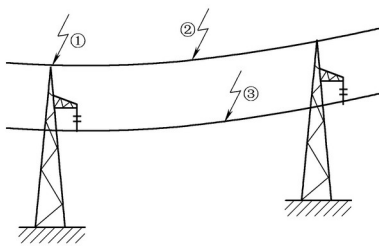
耐雷水平：

雷击线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值,以 KA 为单位。

雷击跳闸率：

每 100km 线路每年由雷击引起跳闸次数。这是衡量线路防雷性能的综合指标。

输电线路的直击雷过电压和耐雷水平



有避雷线线路直击雷的三种情况

我国 110kV 及以上线路一般全线都装设避雷线，而 35kV 及以下线路一般不装

设避雷线，中性点直接接地系统有避雷线的线路遭受直击雷一般有三种情况：

- 雷击杆塔塔顶；
- 雷击避雷线档距中央；
- 雷电绕过避雷线击于导线

线路跳闸需满足的条件：

- 线路落雷
- 雷电流超过线路耐雷水平，线路绝缘发生冲击闪络，雷电流沿闪络通道流入大地，但作用时间很短，线路开关来不及动作
- 当闪络通道流过的工频短路电流的电弧持续燃烧时，才会跳闸停电

雷击跳闸率计算 $n_1 = NgP_1\eta$

雷击杆塔时的跳闸率

绕击跳闸率 $n_2 = NP_\alpha P_2\eta$

$$\begin{aligned}n &= n_1 + n_2 \\ &= N(gP_1 + P_\alpha P_2)\eta\end{aligned}$$

输电线路雷击跳闸率

架设避雷线、降低杆塔接地电阻、架设耦合地线、采用不平衡绝缘、装设自动重合

闸、采用消弧线圈、装设避雷器、加强绝缘是主要的防雷方式

确定输电线路防雷方式时 ,还应全面考虑线路综合因素 ,因地制宜地采取合理的保护措施。

4 发电厂和变电所的防雷保护

发电厂、变电所遭受雷害的两个方面：

- 雷直击于发电厂、变电所

防护措施是采用避雷针或避雷线

- 雷击输电线后产生的雷电波侵入发电厂、变电所

防护措施是装设避雷器，同时还应限制流过避雷器的雷电流幅值和陡度。

发电厂、变电所的直击雷保护

- 110kV 及以上的配电装置,一般将避雷针装在构架上.但在土壤电阻率

的地区,仍宜装设独立避雷针,以免发生反击

- 35kV 及以下的配电装置仍宜采用独立避雷针
- 60kV 的配电装置,在 地区宜采用独立避雷针, 的地区采用构架避雷针

阀式避雷器的保护作用

变压器承受雷电波能力

$$U_{b.5} + 2\alpha \frac{l}{v} \leq U_j$$

U_j :多次截波耐压值

变电所中变压器距避雷器的最大允许电气距离

$$l_m \leq \frac{U_j - U_{b.5}}{2\alpha / v}$$

变电所的进线段保护

- 为使变电所内避雷器能可靠地保护电气设备 ,必须限制流经避雷器的电流

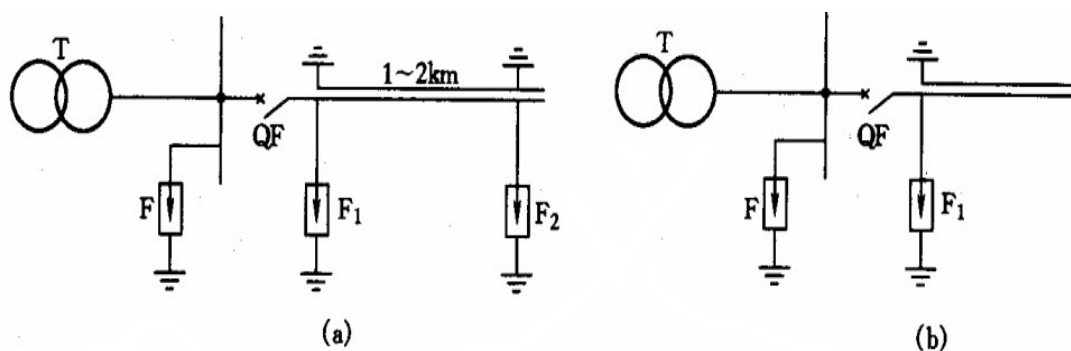
幅值不超过 5kA (330kV-500kV 为 10kA)、限制侵入波陡度 α 不超过

一定的允许值。

- 35-110kV 无避雷线线路,雷击变电所附近导线时,两者都有可能超过。
- 进线段保护是指在临近变电所 1-2km 的一段线路上加强防雷保护措施 ,

从而使避雷器雷电流的幅值和陡度都降低到合理范围内。

35kV 及以上变电所的进线段保护



变电所的进线保护接线

(a) 未沿全线架设避雷线的 35 ~ 110kV 线路进线保护;

(b) 全线架设避雷线进线保护

保护角不宜超过 20 度

变压器的防雷保护

(1) 三绕组变压器的防雷保护

(2) 自耦变压器的防雷保护

(3) 变压器中性点的防雷保护

旋转电机的防雷保护

(1) 旋转电机的防雷保护特点

- 旋转电机主绝缘的冲击耐压值远低于同级变压器的冲击耐压值
- 运行中的旋转电机主绝缘低于出厂时的核定值
- 保护旋转电机用的磁吹避雷器的保护性能与电机绝缘水平的配合裕度很

小 (主绝缘)

- 由于电机绕组匝间电容较小 , 匝间承受电压正比于陡度 , 要求来波陡度较

小(匝间绝缘)

- 电机绕组中性点一般不接地 , 三相进波时 , 中性点电压可达进波电压的两

倍(中性点绝缘)

(2) 直配电机的防雷措施

a) 避雷器保护

b) 电容器保护

c) 电缆段保护

d) 电抗器保护

5 接地的基本概念及原理

接地

接地就是指将电力系统中电气装置和设施的某些导电部分 ,经接地线连接至接地极，使其与大地保持等电位。

接地装置

接地极：埋入地中并直接与大地接触的金属导体

接地线：电气装置、设施的接地端子与接地极连接用的金属导电部分。

接地的分类

- 工作接地

根据电力系统正常运行的需要而设置的接地，比如三相系统的中性点接地

- 保护接地

为了人身安全将电气设备的金属外壳接地，以保证金属外壳固定为地电位，若发生设备绝缘损坏而使外壳不致有危险的电位升高而引起工作人员触电。

- 防雷接地

减小雷电流通过接地装置时引起的电位升高

土壤中的电场强度

$$E = \rho \delta$$

ρ : 土壤电阻率 δ : 大地内的电流密度

零电位

靠近接地极处 , 电流密度和电场强度最大 , 离电流注入点愈远 , 地中电流密度和电场强度就愈小 , 在约 20 ~ 40m 处 , 电位基本上为零。

接触电压

当人触及漏电外壳 , 加于人手脚之间的电压。

跨步电压

当人在分布电位区域内跨开一步 , 两脚间 (水平距离 0.8m) 的电位差。

冲击系数

同一接地装置在冲击和工频作用下, 将具有不同的电阻值, 其比值为冲击系数。

$$\alpha = \frac{R_{ch}}{R_g}$$

冲击系数的大小

- 雷电流的幅值很大, 会使地中电流密度增大而提高电场强度 , 若超过土壤

击穿场强 , 在接地体周围的土壤中会发生局部火花放电 , 使土壤导电性增

强而使冲击接地电阻小于工频接地电阻

-
- 由于雷电流的等值频率很高，接地体自身电感增大，阻碍电流向接地体远

端流通。从而使冲击接地电阻大于工频接地电阻。

一般情况下，火花效应大于电感影响，冲击系数小于 1；电感影响明显时，也可能

大于 1

接地电阻

(1)单根垂直接地体 ($L \gg d$)

$$R_{ch} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

L:接地体的长度

d:接地体的直径 (等边角钢时为 0.84 倍的每边宽度,扁钢时为 0.5 倍的宽

度)

(2)多根垂直接地体并联 ($L \gg d$)

$$R'_{ch} = \frac{R_{ch}}{n\eta}$$

R_{ch} -每根垂直接地体的接地电阻

η -利用系数 (0.65-0.8)

(3)水平接地体

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l^2}{dh} + A \right)$$

L:接地体的长度

h:接地体的埋设深度

A:表示因受屏蔽影响而使接地电阻增加的系数

(4)发电厂接地网的接地电阻

$$R = \frac{0.44\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}}$$

L : 接地体总长度

S : 接地网总面积

第 8 章 电力系统稳态过电压

- 内部过电压:电力系统中,除了雷电过电压外,还存在由于自己内部原因而引起的过电压,包括稳态过电压和操作过电压
- 操作过电压:当开关操作或事故状态时引起系统拓扑结构发生改变时,各储能元件的能量重新分配时发生振荡,从而出现的电压升高的现象,持续时间 0.1s 以内

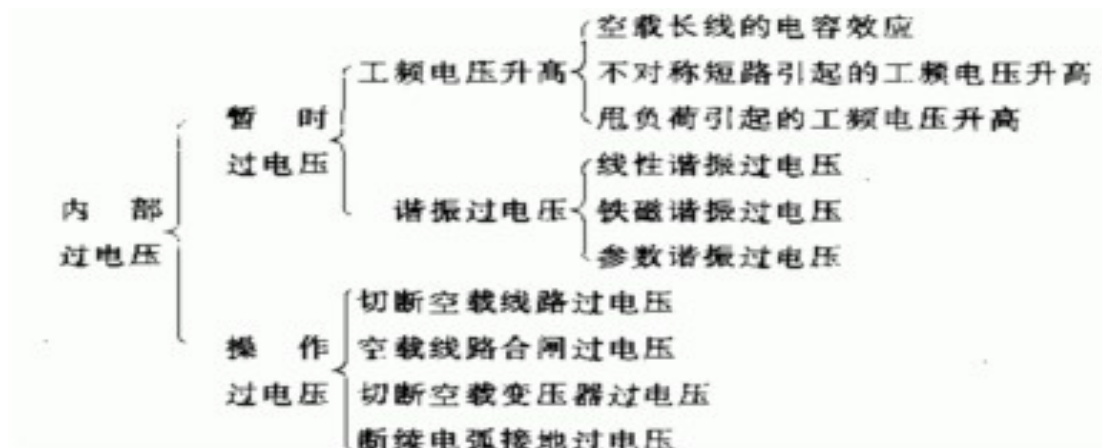
- 稳态过电压：由工频电压升高和谐振现象引起，持续时间比操作过电压长

得多，有些甚至长期存在

内部过电压的能量来自电网本身，一般用最大运行相电压的倍数表示

$$U_m = k \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_N$$

过电压的分类



1 工频过电压的特点

(1) 工频电压升高的大小会直接影响操作过电压的实际幅值。

操作过电压是叠加在工频电压升高之上的，从而达到很高的幅值。

(2) 它的大小会影响保护电器的工作条件和保护效果

避雷器的最大允许工作电压是由避雷器安装处工频过电压值来决定的。如工频

电压过高，避雷器的最大允许工作电压也越高，避雷器的冲击放电电压和残压也将提高，相应被保护设备的绝缘水平要随之提高

(3) 持续时间长，对设备绝缘及其运行性能有重大影响

例如引起油纸绝缘内部电离,污秽绝缘子闪络,铁心过热,电晕等

2 空载线路电容效应引起的工频过电压

a) 工频电压的升高程度与线路长度有关

线路长度 L 越长，末端电压升得越高。但由于受线路电阻和电晕损耗的限制，一般不会超过 2.9 倍

b) 工频电压的升高与电源容量有关

电源容量越小(X_S 越大),工频电压升高越严重。估计最严重的工频电压升高,应以系统最小电源容量为依据

3 不对称短路引起的工频电压升高

- 不对称短路是电力系统中最常见的故障形式,当发生单相或两相对地短路

时,健全相上的电压都会升高,其中单相接地引起的电压升高更大一些。

- 阀式避雷器的灭弧电压通常也就是根据单相接地时的工频电压升高来选定的。

-
- 单相接地时，故障点各相的电压、电流是不对称的，为了计算健全相上的电压升高，通常采用对称分量法和复合序网进行分析。

分析

- 对于中性点不接地系统，当单相接地时，健全相的工频电压升高约为线电压的 1.1 倍。

在选择避雷器时，灭弧电压取 110% 的线电压，称为 110% 避雷器

- 对中性点经消弧线圈接地系统在过补偿时，单相接地时健全相上电压接近线电压。

在选择避雷器灭弧电压时，取 100% 的线电压，称为 100% 避雷器

- 对中性点直接接地系统单相故障接地时，健全相电压约为 0.8 倍线电压

避雷器的最大灭弧电压取为最大线电压的 80%，称为 80% 避雷器

4 甩负荷时引起的工频电压升高

当输电线路在传输较大容量时，断路器因某种原因而突然跳闸甩掉负荷时，会在原动机与发电机内引起一系列机电暂态过程，它是造成工频电压升高的又一原因。

5 工频电压升高的限制措施

在考虑线路的工频电压升高时，如果同时计及空载线路的电容效应、单相接地

及突然甩负荷等三种情况，那么工频电压升高可达到相当大的数值。

实际运行经验表明

- 在一般情况下，220kV 及以下的电网中不需要采取特殊措施来限制工频

电压升高

- 在 330 ~ 500kV 超高压电网中，应采用并联电抗器或静止补偿装置等措

施，将工频电压升高限制到 1.3 ~ 1.4 倍相电压以下

6 谐振过电压的分类

(1) 线性谐振

电感参数 L 与电容 C 、电阻 R 一样，都是线性参数，不随电流、电压而变化，设计

和运行时应设法避开谐振条件

(2) 参数谐振

电感参数周期性变化，设计时应当避开谐振点

(3) 铁磁谐振

带铁心电感的饱和现象

7 铁磁谐振的特点

-
- $\omega L > 1/\omega C$ 是产生铁磁谐振的必要条件
 - 可能存在两个稳定工作点
 - 铁磁元件的非线性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。
 - 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。

8 几种铁磁谐振过电压及其限制措施

- 传递过电压
- 断线引起的铁磁谐振过电压
- 电磁式电压互感器饱和引起的谐振过电压

第 9 章 电力系统操作过电压

1 操作过电压特征

- 持续时间比较短
- 其幅值与系统相电压幅值有一定倍数关系
- 其幅值与系统的各种因素有关 ,有强烈的统计性
- 220kV 及以下系统 ,系统绝缘水平一般可承受操作过电压的冲击。但在超

高压系统中，它是决定系统绝缘水平依据之一

2 切断空载线路过电压

- 切除空载线路是电网中常见操作之一
- 在切空载线路的过程中 ,虽然断路器切断的是几十安到几百安的电容电流
比短路电流小的多
- 如果使用的断路器灭弧能力不强 ,在切断这种电容电流时就可能出现电弧
的重燃，从而引起电磁振荡，造成过电压。

影响因素

① 中性点接地方式

中性点非有效接地电网的中性点电位有可能发生位移,所以某一相的过电压可能特别高一些.一般可估计比中性点有效接地系统的切除空载线路过电压高20%左右

② 断路器的性能

重燃次数对过电压的最大值有决定性的影响 ,采用灭弧性能优异的现代断路器，可以防止或减小电弧重燃的次数,可使过电压降低

③ 母线上的出线数

当母线上同时接有几条出线，而只切除其中的一条时，过电压较小

④ 断路器外侧是否接有电磁式电压互感器

电磁式电压互感器的存在将使线路上的剩余电荷有了附加的泄放途径

限制措施

限制切除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

① 采用灭弧性能强的快速动作断路器

② 利用避雷器保护

③ 断路器线路侧接电磁式电压互感器

④ 线路侧接并联电抗器

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转化为交流电

压

⑤ 使用带并联电阻的断路器

3 空载线路合闸过电压

- 电力系统中，空载线路合闸过电压也是一种常见的操作过电压。通常分为

两种情况，即正常操作和自动重合闸。

- 由于初始条件的差别，重合闸过电压的情况更为严重。

-
- 近年来由于采用了种种措施(如采用不重燃断路器、改进变压器铁芯材料

等)限制或降低了其他幅值更高的操作过电压,空载线路合闸过电压的问

题就显得更加突出。

计划性合闸

由 过电压幅值 = 稳态值 + (稳态值 - 起始量)

$$=U_{\phi}+U_{\phi}=2U_{\phi}$$

自动重合闸

最大值为 $= -U_{\phi} + [-U_{\phi} - (0.91 \sim .98)U_{\phi}]$

$$=(-2.91 \sim 2.98) U_{\phi}。$$

影响因素

1.合闸相位

2. 线路损耗

3. 线路上残压的变化

限制措施

- 装设并联合闸电阻
- 同步合闸
- 利用避雷器来保护

-
- 单相重合闸

4 切除空载变压器过电压

- 正常运行时,空载变压器表现为一励磁电感。
- 切除空载变压器就是开断一个小容量电感负荷,会在变压器和断路器上出现很高的过电压。
- 开断并联电抗器、电动机等,也属于切断感性小电流的情况。

发展过程

研究表明：

- 切断 100A 以上的交流电流时,开关触头间的电弧通常是在工频电流自然过零时熄灭的,等值电感中储存的磁场能量为零;
- 当所切除的电流很小时(变压器的空载电流非常小,只有几安到几十安),开关中的去游离作用又很强,电弧往往提前熄灭,亦即电流会在过零之前就被强行切断,即所谓的截流现象。
- 出现截流时,等值电感中储存的磁场能量全部转化为电场能量,从而出现很高的过电压

影响因素

影响因素及对应的限制措施主要有：

1、断路器性能

切断小电流的电弧时性能越好的断路器，其切空变过电压的幅值越高。

2、变压器特性

- 优质导磁材料应用日益广泛，变压器的激磁电流减小很多；
- 变压器绕组改用纠结式绕法以及增加静电屏蔽等措施，使过电压有所降低。

限制措施

1、采用避雷器保护

在断路器的变压器侧装设阀型避雷器,非雷雨季节也不能退出运行。

2、装设并联电阻

在断路器的主触头上并联一线性或非线性电阻，其限值应接近于被切电感的工作激磁阻抗（数万欧）。

5 断续电弧接地过电压

这种过电压的发展过程和幅值大小都与熄弧时间有关。存在两种熄弧时间：

- 电弧在过渡过程中的高频振荡电流过零时即可熄灭

-
- 电弧的熄灭发生在工频电流过零的时刻

按工频电流过零时熄弧的理论分析得出的结论是：

- 1) 非故障相上的最大过电压为 3.5 倍；
- 2) 故障相上的最大过电压为 2.0 倍。

试验表明

- 故障点电弧在工频电流过零时和工频电流过零时熄灭都是可能的。
 - 发生在大气中的开放性电弧往往要到工频电流过零时才能熄灭；
 - 在强烈去电离的条件下,电弧往往在工频电流过零时就能熄灭。
- 故障相的电弧重燃也不一定在最大恢复电压时发生,且具有分散性
- 目前普遍认为:电弧接地过电压的最大值不超过 3.5 倍,一般在 3 倍以下

影响因素

1、电弧熄灭和重燃时的相位

具有很大的随机性。上述分析是最严重情况时的相位

2、导线相间电容的影响

考虑相间电容时的过电压较低

3、电网损耗电阻

电源内阻、线路导线电阻、接地电弧的弧阻等，加强了振荡的衰减

4、对地绝缘的泄漏电导

泄漏电导使电弧熄灭后电容所贮存的电荷泄漏，从而使过电压有所降低

防护措施

1、采用中性点直接接地方式

若中性点接地，单相接地故障将在接地点产生很大的短路电流，断路器将跳闸，从而彻底消除电弧接地过电压。目前，110kV 及以上电网大多采用中性点直接接地的运行方式。

2、采用中性点经消弧线圈接地方式

采用中性点直接接地方式能够解决断续电弧问题，但每次发生单相接地故障都会引起断路器频繁跳闸，严重影响供电的连续性。所以，我国 35kV 及以下电压等级的配电网采用中性点经消弧线圈接地的运行方式。

6 有关操作过电压的若干结论

- 电力系统中各种操作过电压的根源为电力系统内部储存的电磁能量发生

交换和振荡。其幅值和波形与电网结构及参数、中性点接地方式、断路器

性能、运行接线及操作方式、限压保护装置的性能等多种因素有关。

- 操作过电压具有多种多样的波形和持续时间 ,较长的持续时间对应于线路较长的情况。

- 在断路器内安装并联电阻是降低多种操作过电压的有效措施 ,但不同操作过电压对并联电阻的阻值提出了不同的要求。

- 在 220kV 及以下电网中 , 通常更多地倾向于采用以限制切空线过电压为主的中值电阻 ;

- 而在 500kV 电网中 , 倾向于以限制合空线过电压为主的低值电阻。

- 采用现代 ZnO 避雷器的情况下 , 是否尚需装用并联合闸电阻 , 可以通过验算决定。

- 操作过电压的幅值受到许多因素的影响 , 具有显著的统计性质。在未采用避雷器对操作过电压幅值进行限制的情况下按操作过电压作绝缘配合时 , 可采用下表给出的计算倍数。

操作过电压的计算倍数

系统额定电压 (kV)	中性点接地方式	相对地操作过 电压计算倍数
66 及以下	非有效接地	4.0
35 及以下	有效接地（经小电阻）	3.2
110~220	有效接地	3.0

● 对保护操作过电压用的避雷器有以下一些特殊的要求：

- 有间隙避雷器的火花间隙在操作过电压下的放电电压与工频放电电压不同，而且分散性较大；
- 操作过电压下流过避雷器的电流虽然一般均小于雷电流，但持续时间长，因而对阀片通流容量的要求较高；
- 在操作过电压的作用下，避雷器可能多次动作，因而对阀片和火花间隙的要求都比较苛刻。

第 10 章 绝缘配合

1 绝缘配合的概念

根据电气设备在系统中可能承受的各种电压,并考虑过电压的限制措施和设备的绝缘性能后来确定电气设备的绝缘水平,以便把作用于电气设备上的各种电压(正常工作电压及过电压)所引起的绝缘损坏降低到经济上和运行上所能接受的水平。

其核心问题为确定设备的绝缘水平。

从最大长期工作电压、雷电过电压和内部过电压三个方面来进行分析,有效接地系统的绝缘水平比非有效接地系统低 20%左右。

2 绝缘配合的原则

实际绝缘水平由最大长期工作电压、雷电过电压和内部过电压三因素中最严格的一个来确定

- 220kV 及以下系统中,电气设备绝缘水平主要由雷电过电压决定。

把雷电过电压限制到低于内部过电压是不经济的,具有正常绝缘水平的电力设备,应能承受内部过电压作用

- 超高压系统中,操作过电压的幅值随电压等级而提高,成为主要矛盾。

我国通过改进断路器性能将操作过电压限制在一定水平,通过

并联电抗器将工频过电压限制在一定水平 ,再通过避雷器作后备保

护。由于内部过电压被限制在一定水平内 ,系统绝缘水平仍以雷电

过电压来决定

- 严重污秽地区 ,由于污秽使设备绝缘性能大大降低 ,常发生污闪事

故 ,超过了雷电损害 ,绝缘水平主要由系统最大运行电压决定

- 若过电压被限制在 1.7-1.8 时,工作电压就可能成为决定电网绝缘

水平的主要因素

3 绝缘配合的方法

(1) 多级配合 (1940 以前)

多级配合的原则 :价格越昂贵、修复越困难、损坏后果越严重的绝缘结构 ,其绝缘

水平应选的越高。

(2) 惯用法

确定电气设备绝缘水平的基础是避雷器的保护水平。避雷器的保护水平是以避雷器残压为基础确定的。

(3) 统计法 (20 世纪 70 年代以来)

根据过电压幅值和绝缘闪络电压的概率分布 ,计算绝缘闪络的概率和线路的

跳闸率，正确确定绝缘水平

4 变电站电气设备绝缘水平的确定

➤ 避雷器对设备的保护可有以下两种方式:

(1) 避雷器只用作雷电过电压的保护,而不用来保护内部过电压.

220kV 及以下系统都采用此种方式,内部过电压对正常绝缘无危险

(2) 避雷器主要于雷电过电压的保护,但也用作内部过电压的后备保护

超高压系统中采用 ,依靠断路器将内部过电压限制在一定水平。避雷器在内过电压下一般不动作 ,只有很大时才动作。

➤ 220kV(最大工作电压为 252kV)及以下等级和 220kV 以上电压等级在

过电压保护措施、绝缘耐压试验、最大工作电压倍数、绝缘裕度等方面都

存在差异 ,可分为以下两部分 :

范围 I : $3.5kV \leq u_m \leq 252kV$
 $u_m > 252kV$

范围 II:

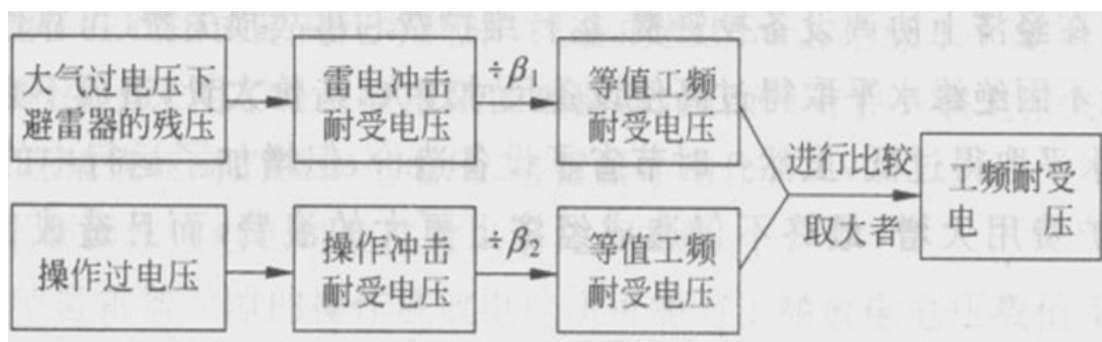
➤ 1、雷电过电压下的绝缘配合

➤ 2、操作过电压下的绝缘配合

➤ 3、工频绝缘水平的确定

➤ 4、长时间工频高压试验

短时工频耐压试验所采用的试验电压值往往要比额定相电压高出数倍 ,它的目的和作用是代替雷电冲击和操作冲击耐压试验、等效地检验绝缘在这两类过电压下的电气强度。



β_1 雷电冲击系数,取 1.48

β_2 操作冲击系数 , 66kV 及以下 1.3 , 110kV 及以上取 1.35

凡是合格通过工频耐压试验的设备绝缘在雷电和操作过电压作用下均能可靠地运行。为了更加可靠和直观 , 国际电工委员会 (IEC) 规定 :

1、对于 300kV 以下的电气设备

(1) 绝缘在工频工作电压、暂时过电压和操作过电压下的性能用短时(1min)工频耐压试验来检验 ;

(2) 绝缘在雷电过电压下的性能用雷电冲击耐压试验来检验。

2、对于 300kV 及以上的电气设备

(1) 绝缘在操作过电压下的性能用操作冲击耐压试验来检验；

(2) 绝缘在雷电过电压下的性能用雷电冲击耐压试验来检验。

5、绝缘子串中绝缘子片数的确定

线路绝缘子串应满足三方面的要求：

- a. 在工作电压下不发生污闪；
- b. 雨天时在操作过电压下不发生闪络（湿闪）；
- c. 具有一定的雷电冲击耐压强度，保证一定的线路耐雷水平。

选工作电压和操作过电压两者要求的大者作为绝缘子的片数，再按雷电过电压

的要法度进行验算即可

6、导线对杆塔的空气间距的确定

输电线路的空气间隙主要有：

(1) 导线对大地：在选择其空气间距时主要考虑地面车辆和行人等的安全通过、

地面电场强度及静电感应等问题。

(2) 导线对导线：应考虑相间过电压的作用、相邻导线在大风中因不同步摆动或

舞动而相互靠近等问题。导线与塔身之间的距离也决定着导线之间的空气间距。

(3) 导线对架空地线 : 按雷击于档距中央避雷线上时不至于引起导、地线间气隙击穿这一条件来选定。

(4) 导线对杆塔及横担

从电压幅值来说，一般是雷电过电压最高、操作过电压次之、工频工作电压最低；但从电压作用时间来看，情况正好相反。

➤ 由于工作电压长期作用在导线上，所以在计算它的风偏角 时，应取该线

路所在地区的最大设计风速 。

➤ 操作过电压持续时间较短，通常在计算其风偏角

时，取计算风速等于 。

➤ 雷电过电压持续时间最短，而且强风与雷击点同在一处出现的概率极小，

因此通常取其计算风速等于 $10 \sim 15 \text{ m/s}$ 。

分别按工作电压、操作过电压、雷电过电压求出静间距，再考虑相应的风偏角，

最后选三者之中最大者。

高电压技术冲刺试卷(1)

1.流注理论未考虑()的现象。

- A.碰撞游离 B.表面游离
- C.光游离 D.电荷畸变电场

2.极化时间最短的是()。

- A.电子式极化 B.离子式极化
- C.偶极子极化 D.空间电荷极化

3.先导通道的形成是以()的出现为特征。

- A.碰撞游离 B.表面游离
- C.热游离 D.光游离

4.下列因素中，不会影响液体电介质击穿电压的是()

-
- A.电压的频率 B.温度
- C.电场的均匀程度 D. 杂质

5.电晕放电是一种 ()。

- A.滑闪放电 B.非自持放电
- C.沿面放电 D.自持放电

6.以下四种气体间隙的距离均为 10cm，在直流电压作用下，击穿电压最低的是 ()。

- A.球—球间隙(球径 50cm) B.棒—板间隙，棒为负极
- C.针—针间隙 D.棒—板间隙，棒为正极

7.不均匀的绝缘试品，如果绝缘严重受潮，则吸收比 K 将()

- A.远大于 1 B.远小于 1
- C.约等于 1 D.不易确定

8.雷击线路附近地面时，导线上的感应雷过电压与导线的 ()

- A. 电阻率成反比 B.悬挂高度成反比
- C.悬挂高度成正比 D. 电阻率成正比

二、填空题(本大题共 9 小题，每空 1 分，共 18 分)

-
1. 固体电介质电导包括_____电导和_____电导。
 2. 极不均匀电场中，屏障的作用是由于其对_____的阻挡作用，造成电场分布的改变。
 3. 电介质的极化形式包括_____、_____、_____和夹层极化。
 4. 气体放电现象包括_____和_____两种现象。
 5. 带电离子的产生主要有碰撞电离、_____、_____、表面电离等方式。
 6. 工频耐压试验中，加至规定的试验电压后，一般要求持续_____秒的耐压时间。
 7. 按绝缘缺陷存在的形态而言,绝缘缺陷可分为_____缺陷和_____缺陷两大类。
 8. 在接地装置中，接地方式可分为_____、_____、_____。
 9. 输电线路防雷性能的优劣主要用_____和_____来衡量。

三、判断题(本大题共 **5** 小题，每小题 **2** 分，共 **10** 分)在每小题的括号内对的打“√”，错的打“×”。

1. 无论何种结构的电介质，在没有外电场作用时，其内部各个分子偶极矩的矢量和平均来说为零，因此电介质整体上对外没有极性。()

2.在四种电介质的基本极化形式中，只有电子式极化没有能量损耗。()

3.测量电气设备的绝缘电阻时一般要加直流电压，绝缘电阻与温度没有关系。()

4.防雷接地装置是整个防雷保护体系中可有可无的一个组成部分。()

5.管式避雷器实质上是一只具有较强灭弧能力的保护间隙。()

四、名词解释题(本大题共 5 小题，每小题 6 分，共 30 分)

1.吸收比： 2.雷击跳闸率： 3.雷暴日： 4.伏秒特性： 5.气体击穿：

五、简答题(本大题共 2 小题，每小题 8 分，共 16 分)

1.什么是电介质？它的作用是什么？ 2.简述避雷针的保护原理。

六、计算题(本大题共 1 小题，共 10 分)

1.某电厂原油罐直径为 10m，高出地面 10 m，现采用单根避雷针保护，针距罐壁最少 5 m，试求该避雷针的高度是多少？

高电压技术冲刺试卷(2)

1. 衡量电介质损耗的大小用 () 表示。

A.相对电介质

B.电介质电导

C.电介质极化 D.介质损失角正切

2.以下哪种因素与 $\tan \delta$ 无关。()

A.温度 B.外加电压
C.湿度 D.电压的频率

3.SF₆ 气体具有较高绝缘强度的主要原因之一是()

A.无色无味性 B.不燃性
C.无腐蚀性 D.电负性

4.下列因素中，不会影响液体电介质击穿电压的是()

A.电压的频率 B.温度
C.电场的均匀程度 D. 杂质

5.下列哪种电介质存在杂质“小桥”现象()

A.气体 B.液体
C.固体 D.无法确定

6.介质损耗角正切值测量时，采用移相法可以消除()的干扰。

A.高于试验电源频率 B.与试验电源同频率
C.低于试验电源频率 D.任何频率

7.不均匀的绝缘试品，如果绝缘严重受潮，则吸收比 K 将()

- A.远大于 1 B.远小于 1
- C.约等于 1 D.不易确定

8.雷击线路附近地面时，导线上的感应雷过电压与导线的()

- A.悬挂高度成反比 B.电阻率成反比
- C.悬挂高度成正比 D.电阻率成正比

二、填空题(本大题共 9 小题，每空 1 分，共 20 分)

1.高电压技术研究的主要对象是_____、_____和_____等。

2.电介质极化的基本形式主要有_____、_____、_____和空间电荷极化。

3._____是表征电介质在电场作用下极化程度的物理量。

4.按照气体分子得到能量形式的不同，气体分子可分为_____、_____和_____三种游离形式。

5.工频耐压试验中，加至规定的试验电压后，一般要求持续_____秒的耐压时间。

6. $\text{tg } \delta$ 测量过程中可能受到两种干扰，一种是_____和_____。

7. 按绝缘缺陷存在的形态而言,绝缘缺陷可分为_____缺陷和_____缺陷两大类。

8.在接地装置中，接地方式可分为_____、_____、_____。

9. 输电线路防雷性能的优劣主要用_____和_____来衡量。

三、判断题(本大题共 5 小题，每小题 2 分，共 10 分)在每小题的括号内对的打“√”，错的打“×”。

1.伏秒特性主要用于比较不同设备绝缘的冲击击穿特性。()

2.测量试品的绝缘电阻时 ,规定以加电压后 1 秒测得的数值为该试品的绝缘电阻值。()

3.一般而言，吸收比越大，被试品的绝缘性越好。()

4. 防雷接地装置是整个防雷保护体系中可有可无的一个组成部分。()

5. 国际国家标准规定高电压测量误差在 $\pm 5\%$ 以内。()

四、名词解释题(本大题共 3 小题，每小题 6 分，共 18 分)

1.吸收比：

2.耐雷水平：

3.雷暴日：

五、简答题(本大题共 2 小题，每小题 8 分，共 16 分)

1. 简述排气式避雷器的工作原理。 2. 简述避雷针的保护原理。

六、计算题(本大题共 2 小题，第小题 10 分，共 20 分)

1. 某电厂原油罐直径为 10m，高出地面 10 m，现采用单根避雷针保护，针距罐壁最少 5 m，试求该避雷针的高度是多少？

2. 已知某输电导线上方无避雷线，雷击点与导线的距离为 50 m，导线离地的高度是 10 m。试求：

(1) 导线上的感应雷过电压最大值 U_i ；

(2) 如果导线上有避雷线，且避雷线接地，则导线上的感应雷过电压是多少？

(已知耦合系数 $k_0=0.5$ ，雷电流的幅值 $I=80\text{KA}$)

高电压技术冲刺试卷(3)

一、填空题 (本大题共 10 小题，每小题 1 分，共 10 分)

1 . 在末端开路的情况下，波发生反射后，导线上的电压会_____。

2 . 每一雷暴日、每平方公里地面遭受雷击的次极化数称为_____。

3 . 极不均匀电场中，屏障的作用是由于其对_____的阻挡作用，造成电场分布

的改变。

4. 先导放电与其它放电的典型不同点是出现了_____。

5. 波阻抗为 Z 的线路末端接负载电阻 R ,且 $R=Z$,当入射波 U_0 入侵到末端时 ,
折射系数 α =_____。

6. Z_1 、 Z_2 两不同波阻抗的长线相连于 A 点 ,行波在 A 点将发生反射 ,反射系数
 β 的取值范围为_____。

7. 当导线受到雷击出现冲击电晕以后 ,它与其它导线间的耦合系数将_____。

8. 衡量输电线路防雷性能的主要指标是雷击跳闸率和_____。

9. 电源容量越小 ,空载长线的电容效应_____。

10. 根据巴申定律 ,在某一 PS 值下 ,击穿电压存在_____值。

二、单项选择题 (本大题共 10 小题 ,每小题 **2** 分 ,共 **20** 分)

11、流注理论未考虑()的现象。

A.碰撞游离

B.表面游离

C.光游离

D.电荷畸变电场

12、波在线路上传播 ,当末端短路时 ,以下关于反射描述正确的是_____。

A.电流为 0 ,电压增大一倍

B.电压为 0，电流增大一倍

C.电流不变，电压增大一倍

D.电压不变，电流增大一倍

13、极化时间最短的是()

A.电子式极化

B.离子式极化

C.偶极子极化

D.空间电荷极化

14、雷电流通过避雷器阀片电阻时，产生的压降称为()

A．额定电压

B．冲击放电电压

C．残压

D．灭弧电压

15、GIS 变电所的特点之一是()

A．绝缘的伏秒特性陡峭

B．波阻抗较高

C．与避雷器的电气距离较大

D．绝缘没有自恢复能力

16、保护设备 S1 的伏秒特性 V_1-t 与被保护设备 S2 的伏秒特性 V_2-t 合理的配合是()

A． V_1-t 始终高于 V_2-t

B． V_1-t 始终低于 V_2-t

C． V_1-t 先高于 V_2-t ，后低于 V_2-t

D. V_1-t 先低于 V_2-t , 后高于 V_2-t

17、介质损耗角正切值测量时, 采用移相法可以消除()的干扰。

- A. 高于试验电源频率 B. 与试验电源同频率
C. 低于试验电源频率 D. 任何频率

18、雷电绕过避雷线直击于线路的概率()

- A. 平原地区比山区高 B. 与系统接地方式有关
C. 平原地区比山区低 D. 与系统接地方式无关

19、根据我国有关标准, 220KV 线路的绕击耐雷水平是()

- A. 12kA B. 16kA C. 80kA D. 120kA

20、当变压器带有一段电缆时, 使用截流水平相同的断路器切除空载变压器产生的过电压会()

- A. 变大 B. 变小
C. 持续时间长 D. 持续时间短

三、判断题。(本大题共 8 小题, 每小题 1 分, 共 8 分)

() 1. 兆欧表有两个端子, 即测量端与接地端。

() 2. 球-球或球-板间隙都属于极不均匀电场。

-
- () 3 . 对于输电线间的耦合系数 K_{12} 与 K_{21} 是相等的。
- () 4 . 对于同结构的杆塔山区的绕击率大于平原地区的绕击率。
- () 5 . 雷击线路时，线路绝缘不发生闪络的雷电流叫耐雷水平。
- () 6 . 电介质的电导率随温度的升高而升高。
- () 7 . 绝缘电阻和吸收比测量试验属于破坏性试验。
- () 8 . 接地装置由接地体及接地线组成。

四、名词解释题（本大题共 4 小题，每小题 **3** 分，共 **12** 分）

21. 自恢复绝缘

22. 输电线路耐雷水平

23. 进线段保护

24. 谐振过电压

五、简答题（本大题共 6 小题，每小题 **5** 分，共 **30** 分）

25、试说明电力系统中限制操作过电压的措施。

26、测量绝缘材料的泄漏电流为什么用直流电压而不用交流电压？

27、测量绝缘电阻试验中，为什么在绝缘表面受潮时要求装上屏蔽环？

28、简述彼得逊法则的内容、应用和需注意的地方。

29、一些卤族元素化合物因具有高电气强度常用作灭弧度介质(如 SF_6) ,试阐述其具有高电气强度的原因。

30、为什么在断路器的主触头上并联电阻有利于限制切除空载长线时的过电压？

六、计算题(本大题共 2 小题，每小题 10 分，共 20 分)

31、入射波 u_1 为 100V ,由架空线($Z_1=500\Omega$)进入一电缆($Z_2=50\Omega$) ,求折射波 u_2 及反射波 u_f 的数值。

32、某单位一座 22m 高的水塔附近 ,距离 10m 处有一变电所。水塔上装有一支 5m 的避雷针，经计算问塔上的避雷针能否保护这一变电所。

高电压技术冲刺试卷(4)

一、填空题(本大题共 10 小题，每空 1 分，共 10 分)

1.沿面放电发展到整个表面空气层击穿的现象叫_____。

2.避雷器其类型分为_____、管型避雷器、阀型避雷器。

3.接地装置可分为保护接地、工作接地、_____接地。

4、传输线路的波阻抗与单位长度电感 L_0 和_____有关，与线路长度无关。

5.变压器内部固体绝缘的老化形式有：电老化和_____。

-
- 6.根据内部过电压产生的原因可分为_____过电压和暂时过电压。
- 7.避雷针(线)的保护范围是指具有_____左右雷击概率的空间范围。
- 8.降低杆塔接地电阻是提高线路耐雷水平和防止_____的有效措施。
- 9.电源容量越小，空载长线的电容效应_____。
- 10.用 QSI 型电桥测量介质损失角正切时，其接线方式分为_____正接线和_____接线。

二、单项选择题(本大题共 10 小题，每小题 2 分，共 20 分)

11. 雷击跳闸率是指每____km 线路每年由雷击引起的跳闸次数。
- A . 10 B . 100 C . 500 D . 1000
12. 根据设备的绝缘水平和造价，以下几种电压等级中，允许内过电压倍数最高的是()
- A . 110kV B . 35kV 及以下
- C . 220kV D . 500kV
- 13、流注理论未考虑()的现象。
- A . 碰撞游离 B . 表面游离
- C . 光游离 D . 电荷畸变电场

14.SF₆ 气体具有较高绝缘强度的主要原因之一是()

- A.无色无味性 B.不燃性
C.无腐蚀性 D.电负性

15.介质损耗角正切值测量时，采用移相法可以消除()的干扰。

- A.高于试验电源频率 B.与试验电源同频率
C.低于试验电源频率 D.任何频率

16.不均匀的绝缘试品，如果绝缘严重受潮，则吸收比 K 将()

- A.远大于 1 B.远小于 1
C.约等于 1 D.不易确定

17.构成冲击电压发生器基本回路的元件有冲击性主电容 C_1 ,负荷电容 C_2 ,波头电阻 R_1 和波尾电阻 R_2 。为了获得一很快由零上升到峰值然后较慢下降的冲击电压，应使()

- A. $C_1 \gg C_2, R_1 \gg R_2$ B. $C_1 \gg C_2, R_1 \ll R_2$
C. $C_1 \ll C_2, R_1 \gg R_2$ D. $C_1 \ll C_2, R_1 \ll R_2$

18.下列表述中，对波阻抗描述不正确的是()

- A.波阻抗是前行波电压与前行波电流之比

B.对于电源来说波阻抗与电阻是等效的

C.线路越长，则波阻抗越大

D.波阻抗的大小与线路的几何尺寸有关

19.根据我国有关标准，220KV 线路的绕击耐雷水平是()

A.12KA B.16kA C.80kA D.120kA

20. 在 110kV ~ 220kV 系统中，为绝缘配合许可的相对地操作过电压的倍数为_____。

A . 4.0 倍 B . 3.5 倍 C . 3.0 倍 D 2.75 倍

三、判断题。(本大题共 8 小题，每小题 1 分，共 8 分)

() 1.伏秒特性主要用于比较不同设备绝缘的冲击击穿特性。

() 2 . 对于同结构的杆塔山区的绕击率大于平原地区的绕击率。

() 3.测量试品的绝缘电阻时，规定以加电压后 1 秒测得的数值为该试品的绝缘电阻值。

() 4.一般而言，吸收比越大，被试品的绝缘性越好。

() 5.电介质的电导率随温度的升高而升高。

() 6.防雷接地装置是整个防雷保护体系中可有可无的一个组成部分。

() 7.绝缘电阻和吸收比测量试验属于破坏性试验。

() 8.国际国家标准规定高电压测量误差在 $\pm 5\%$ 以内。

四、名词解释题(本大题共 4 小题，每小题 3 分，共 12 分)

21、电气距离

22、绝缘配合

23、自持放电

24、雷电日和雷电小时

五、简答题(本大题共 6 小题，每小题 5 分，共 30 分)

25. 什么叫电介质的极化？极化形式分为哪三种？

26.提高液体介质击穿电压的措施有哪些？

27.测量绝缘电阻试验中，为什么在绝缘表面受潮时要求装上屏蔽环？

28.分布参数回路的波阻抗与集中参数回路中的电阻有何不同？

29.限制雷电破坏作用的基本措施是什么？它们各起什么保护作用？

30. 防雷的基本措施有哪些？请简要说明。

六、计算题(本大题共 2 小题，每小题 10 分，共 20 分)

31.某台电力变压器需进行 72KV 的工频耐压试验， $\text{tg } \delta$ 试验时测得其等值电容

$C_x=4200\text{pF}$ 。现有数台容量不同的 $100/0.4(\text{kV})$ 的工频试验变压器,应选择一

台额定容量为多少的试验变压器才能满足试验的要求?

32,有一幅值为 200kV 的直角波沿波阻抗为 50Ω 的电缆线路侵入发电机绕组

(波阻抗为 800Ω)。绕组每匝长度为 3米 ,匝间绝缘允许承受的电压为 600V ,

绕组中波的传播速度为 $6\times 10^7\text{ m/s}$,求用电容器来保护匝间绝缘时所需的电容值

高电压技术冲刺试卷(5)

一、选择题(每小题 2 分,共 16 分)

1、下列表述中,对波阻抗描述不正确的是_____。

A .波阻抗是前行波电压与前行波电流之比 B .对于电源来说波阻抗与电阻是等效的

C .线路越长,波阻抗越大 D .波阻抗的大小与线路的几何尺寸有关

2、电晕放电是一种_____。

A . 均匀场中放电 B . 非自持放电 C . 电弧放电 D . 自持放电

3、以下哪个不是发生污闪最危险的气象条件_____。

A.大雾 B.毛毛雨 C.凝露 D.大雨

4、以下哪种材料具有憎水性_____。

A. 金属 B. 电瓷 C. 玻璃 D. 硅橡胶

5、解释电压较高、距离较长的间隙中的气体放电过程可用___。

A. 汤逊理论 B. 流注理论 C. 巴申定律 D. 小桥理论

6、雷电流具有冲击波形的特点：_____。

A. 缓慢上升，平缓下降 B. 缓慢上升，快速下降

C. 迅速上升，平缓下降 D. 迅速上升，快速下降

7、波在线上传播，当末端开路时，以下关于反射描述正确的是_____。

A. 电流为 0，电压增大一倍 B. 电压为 0，电流增大一倍

C. 电流不变，电压增大一倍 D. 电压不变，电流增大一倍

8、我国的规程中规定线路防雷设计用雷电流波头时间为___。

A. $1.2\mu s$ B. $1.5\mu s$ C. $2.6\mu s$ D. $10\mu s$

二、填空题 (每空 2 分，共 22 分)

1、流注理论未考虑_____电离的现象。

2、根据巴申定律，在某一 PS 值下，击穿电压存在___值。

3、气体内的各种粒子因高温而动能增加，发生相互碰撞而产生游离的形式称为_____。

4、传输线路的波阻抗与_____和_____有关，与线路长度无关。

5、在极不均匀电场中，正极性击穿电压比负极性击穿电压_____。

6、减少绝缘介质的介电常数可以_____电缆中电磁波的传播速度。

7、沿面放电就是沿着 _____表面气体中发生的放电。

8、埋入地中的金属接地体称为_____装置，其作用是_____。

9、电磁波沿架空线路的传播速度为_____。

三、简答题（每小题 6 分，共 24 分）

1、分布参数的波阻抗与集中参数电路中的电阻有何不同？

2、避雷针（线）的作用原理？

3、避雷器的保护原理？

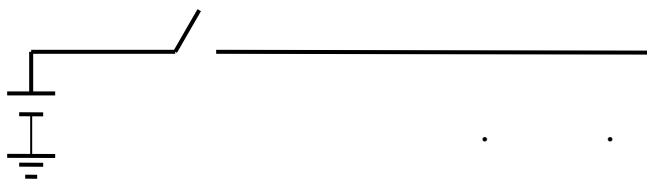
4、工程上采用什么措施来提高输电线路的耐雷水平？

四、综合题：（共 38 分）

1、直流电源合闸于空载线路的波过程。如下图所示，线路长度为 L ， $t=0$ 时合

闸于直流电源 E ，求线路末端电压 U_3 和中点电压 U_2 随时间变化的过程？

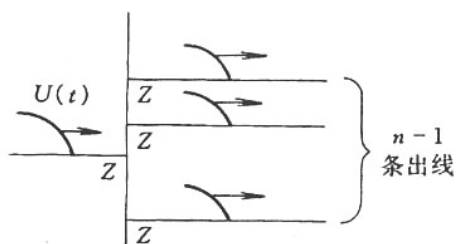
(10 分)



E	1	2	3
---	---	---	---

- 2、已知某输电线路的波阻抗 $Z=400\Omega$ ，测得该线路上 A 点的电压 $U_A = 900\text{kV}$ ，电流 $I_A = 1\text{kA}$ 。试求该点的前行波电压 U_b 和反行波电压 U_f ？(8 分)

- 3、如图，一变电所母线上接有 n 条架空线路，每条线路波阻抗为 400Ω ，当一条线路落雷，电压幅值为 400kV 入侵变电所，求母线上电压。(10 分)



- 4、某电厂有一圆油罐，直径 10m ，高出地面 10m ，用独立避雷针保护，要求针距罐壁至少 5m ，试设计避雷针的高度？(10 分)

高电压技术冲刺试卷(1)参考答案

一、单项选择题(本大题共 8 小题，每小题 2 分，共 16 分)

1.B 2.A 3.C 4.A 5.D

6.D 7.C 8.B

二、填空题(本大题共 9 小题，每空 1 分，共 18 分)

- 1.表面、体积
- 2.空间电荷
- 3.电子式极化、离子式极化、偶极子极化
- 4.击穿、闪络
- 5.光电离、热电离
- 6.60
- 7.集中性、分散性
- 8.防雷接地、工作接地、保护接地
- 9.耐压水平、雷击跳闸率

三、判断题(本大题共 5 小题，每小题 2 分，共 10 分)在每小题的括号内对的打

“√”，错的打“×”。

- 1 . (√) 2 . (×) 3 . (×) 4 . (×) 5 . (√)

四、名词解释题(本大题共 5 小题，每小题 6 分，共 30 分)

- 1.指的是电流衰减过程中的两个瞬间测得的两个电流值或两个相应的绝缘电阻阻值之比。(或指被试品加压 60 秒时的绝缘电阻与加压 15 秒时的绝缘电阻之

比。)

2.指每 100KM 线路每年由雷击引起的跳闸次数。

3.指某地区一年四季中有雷电放电的天数，一天中只要听到一次及以上雷声

就是一个雷暴日。

4.对某一冲击电压波形，间隙的击穿电压和击穿时间的关系称为伏秒特性。

5.气体由绝缘状态变为导电状态的现象称为击穿。

五、简答题(本大题共 2 小题，每小题 8 分，共 16 分)

1.电介质是指通常条件下导电性能极差的物质，云母、变压器油等都是电介质

电介质中正负电荷束缚得很紧，内部可自由移动的电荷极少，因此导电性能

差。作用是将电位不同的导体分隔开来，以保持不同的电位并阻止电流向不

需要的地方流动。

2. 当雷云放电接近地面时它使地面电场发生畸变，在避雷针的顶端，形成局

部电场强度集中的空间，以影响雷电先导放电的发展方向，引导雷电向避雷

针放电，再通过接地引下线和接地装置将雷电流入大地，从而使被保护物体

免遭雷击。

六、计算题(本大题共 1 小题，共 10 分)

解：设针高 $h < 30\text{m}$

则 $p=1$, 物高 $h_x=10\text{m}$, 保护半径 $r_x=10+5=15\text{m}$

若 $h \leq 2h_x$ (即 $h \leq 20\text{m}$)

由 $r_x=(h-h_x)p$ 代入数据得： $15=(h-10) \times 1$

解得 $h=25\text{m}$ (与 $h \leq 20\text{m}$ 不符，舍去)

若 $h > h_x$ (即 $h > 20\text{m}$)，由 $r_x=(1.5h-2h_x)p$ 代入数据得：

$$15=(1.5h-2 \times 10) \times 1$$

解得 $h=23.34\text{m}$

由此得该避雷针的高度应为 23.34m 。

高电压技术冲刺试卷(2)参考答案

一、单项选择题(本大题共 8 小题，每小题 2 分，共 16 分)

1.D 2.C 3.D 4.A 5.B

6.B 7.C 8.A

二、填空题(本大题共 9 小题，每空 1 分，共 20 分)

1.电气装置的绝缘、绝缘的测试、电力系统的过电压

2.电子式极化、离子式极化、偶极子式极化

3.相对介电常数

4.碰撞游离、光游离、热游离

5.60

6.电场干扰、磁场干扰

7.集中性缺陷、分散性缺陷

8.防雷接地、工作接地、保护接地

9.耐压水平、雷击跳闸率

三、判断题(本大题共 5 小题，每小题 2 分，共 10 分)在每小题的括号内对的打

“√”，错的打“×”。

1 . (√)

2 . (×)

3 . (√)

4 . (×)

5 . (√)

四、名词解释(本大题共 4 小题，每小题 5 分，共 20 分)

1.指的是电流衰减过程中的两个瞬间测得的两个电流值或两个相应的绝缘电阻值之比。(或指被试品加压 60 秒时的绝缘电阻与加压 15 秒时的绝缘电阻之比。)

2.雷击时线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值。

3.指某地区一年四季中有雷电放电的天数，一天中只要听到一次及以上雷声就是一个雷暴日。

五、简答题(本大题共 3 小题，每小题 6 分，共 18 分)

1 当雷电冲击波袭来时，避雷器的两个间隙被击穿，使雷电流入地，冲击电流消失后间隙流过工频续流，在工频续流电弧的高温作用下，产气管内分解大量气体形成高压，高压气体从环形电极中心孔口喷出，对电弧产生强烈的纵吹作用，使工频续流在第一次过零时熄灭。

2. 当雷云放电接近地面时它使地面电场发生畸变，在避雷针的顶端，形成局部电场强度集中的空间，以影响雷电先导放电的发展方向，引导雷电向避雷针放电，再通过接地引下线和接地装置将雷电流入大地，从而使被保护物体免遭

雷击。

六、计算题(本大题共 2 小题，每小题 10 分，共 20 分)

1、解：设针高 $h < 30\text{m}$

则 $p=1$, 物高 $h_x=10\text{m}$, 保护半径 $r_x=10+5=15\text{m}$

若 $h \leq 2h_x$ (即 $h \leq 20\text{m}$)

由 $r_x=(h-h_x)p$ 代入数据得： $15=(h-10) \times 1$

解得 $h=25\text{m}$ (与 $h \leq 20\text{m}$ 不符，舍去)

若 $h > h_x$ (即 $h > 20\text{m}$)，由 $r_x=(1.5h-2h_x)p$ 代入数据得：

$$15=(1.5h-2 \times 10) \times 1$$

解得 $h=23.34\text{m}$

由此得该避雷针的高度应为 23.34m。

高电压技术冲刺试卷(3)参考答案

一、填空题 (本大题共 10 小题，每小题 1 分，共 10 分)

1. 提高一倍 2. 地面落雷密度 3. 空间电荷 4. 梯级先导

5. 1 6. $-1 \leq \beta \leq 1$ 7. 增大 8. 耐雷水平

9. 越大 10. 极小(最低)

二、单项选择题（本大题共 10 小题，每小题 2 分，共 20 分）

11.B 12.A 13. A 14.C 15.B

16.B 17.A 18.C 19.A 20.B

三、选择题(本大题共 8 小题，每小题 1 分，共 8 分)

1-4 × × × √ 5-8 × √ × √

三、名词解释题（本大题共 4 小题，每小题 3 分，共 12 分）

21.发生击穿后，一旦去掉外加电压，能恢复其绝缘性能的绝缘。

22.雷击时线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值。

23.进线段保护就是在接近变电所 1~2km 的一段线路上架设避雷线

24.当系统进行操作或发生故障时，某一回路自振频率与电源频率相等时，将发生谐振现象，导致系统中某些部分(或设备)上出现的过电压。

四、简答题（本大题共 6 小题，每小题 5 分，共 30 分）

25. 答 : (1) 利用断路器并联电阻限制分合闸过电压 : 1、利用并联电阻限制合空线过电压 2、利用并联电阻限制切空线过电压 (2) 利用避雷器限制操作过电压

26. 答 : 因为直流电压作用下的介质损失仅有漏导损失，而交流作用下的介质损

失不仅有漏导损失还有极化损失。所以在直流电压下，更容易测量出泄漏电流。

27. 答：因为在绝缘表面受潮时，沿绝缘表面的泄漏电流将增大，若此泄漏电流流入电流线圈中，将使绝缘电阻读数显著降低，引起错误的判断。

装上屏蔽环后，表现泄漏电流不再流入电流线圈，而流过电流线圈的只是绝缘体的泄漏电流，因此加上屏蔽环后测得的值能较真实地反映绝缘电阻的大小。

28. 答：在计算线路中一点的电压时，可以将分布电路等值为集中参数电路：线路的波阻抗用数值相等的电阻来代替，把入射波的 2 倍作为等值电压源。这就是计算节点电压的等值电路法则，也称彼得逊法则。

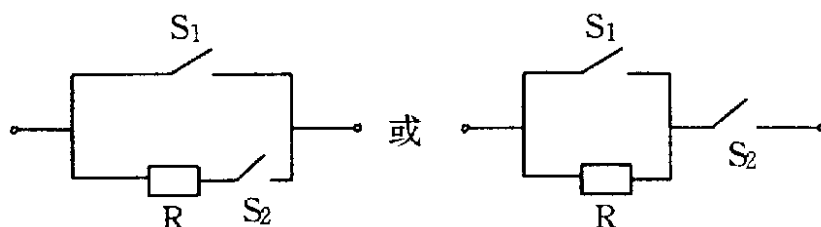
利用这一法则，可以把分布参数电路中波过程的许多问题简化成一些集中参数电路的暂态计算。但必须注意，如果 Z_1, Z_2 是有限长度线路的波阻抗，则上述等值电路只适用于在 Z_1, Z_2 端部的反射波尚未回到节点以前的时间内。

29. 答：(1) 由于含有卤族元素，这些气体具有很强的电负性，气体分子容易和电子结合成为负离子，从而削弱了电子的碰撞电离能力，同时又加强了复合过程。

(2) 这些气体的分子量都比较大，分子直径较大，使得电子在其中的自由行程缩短，不易积聚能量，从而减少了碰撞电离的能力。

(3) 电子在和这些气体的分子相遇时，还易引起分子发生极化等过程，增加能量损失，从而减弱碰撞电离的能力。

30.



如图所示,切除空载长线时,主触头 S_1 首先断开,而电阻 R 和辅助触头 S_2 并未断开,因此线路上的残余电荷通过电阻 R 释放,电阻 R 能抑制振荡,这时主触头两端的电压仅为 R 上的压降。然后辅助触头 S_2 开断,线路上的残压已较低,辅助触头 S_2 上的恢复电压也较低,所以断路器两端不容易发生电弧重燃,也就不至于形成很高的过电压。

五、计算题(本大题共 2 小题,每小题 10 分,共 20 分)

31.解:解: $u_2 = \frac{2Z_2 u_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{2 \times 50 \times 100}{500 + 50} = 18(V)$

$$u_f = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_1 = \frac{50 - 500}{500 + 50} u_1 = -82(V)$$

32、解： $h_x=22\text{m}$ $h=22+5=27\text{m}$

$$\because h_x > h/2$$

$$\therefore r_x = (h - h_x)p = 5\text{m}$$

其中 $p=1$

$$\therefore r_x < 10\text{m}$$

$\therefore$ 塔上的避雷针不能保护这一变电所。

高电压技术冲刺试卷(4)参考答案

一、填空题(每小题 1 分，共 15 分)

1.闪络 2.保护间隙 3.防雷接地 4.电容 C_0 5.热老化

6.操作 7. 0.1% 8.反击 9.越大 10.反

二、单项选择题(每小题 1 分，共 10 分)

11.B 12.B 13.B 14.D 15.B

16.B 17.B 18.C 19.A 20.C

三、选择题(本大题共 8 小题，每小题 1 分，共 8 分)

1-4 $\checkmark \checkmark \times \checkmark$ 5-8 $\checkmark \times \times \checkmark$

四、名词解释(每小题 3 分，共 12 分)

21.避雷器与各个电气设备之间不可避免地要沿连接线分开一定的距离。

22.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，合理地确定设备必要的绝缘水平，达到在经济上和安全运行上总体效益最高的目的。

23.不需要靠外界电力因数的作用，由放电过程本身就可以不断地供给引起后继电子崩的二次电子。

24. 雷电日是该地区 1 年中有雷电的天数。

雷电小时是该地区 1 年中有雷电的小时数。

五、简答题(本大题共 6 小题，每小题 5 分，共 30 分)

25. 1：在外电场的作用下，电介质的正、负电荷将沿电场方向作有限的位移或转向，形成电矩。这就是电介质的极化。

2：电子式极化、离子式极化、偶极子极化。

26.(1)减小杂质，包括过滤、防潮、脱气。

(2)改进绝缘设计，包括采用覆盖层、改进电极形状、使用绝缘层、加屏障。

27.因为在绝缘表面受潮时，沿绝缘表面的泄漏电流将增大，若此泄漏电流流入电流线圈中，将使绝缘电阻读数显著降低，引起错误的判断。

装上屏蔽环后，表现泄漏电流不再流入电流线圈，而流过电流线圈的只是绝缘体的泄漏电流，因此加上屏蔽环后测得的值能较真实地反映绝缘电阻的大小。

28.(1)波阻抗表示同一方向的电压波和电流波大小的比值，前行波电压与前行波电流之比取正号，反行波电压与反行波电流之比取负号，若导线上既有前行波，又有反行波时，导线上总的电压与总的电流之比不等于波阻抗。

而电阻等于其上总的电压与总的电流之比。

(2)电磁波通过波阻抗为 Z 的导线时，能量以电磁能的形式储存在周围介质中，而不是被消耗掉。

(3)波阻抗的数值只和导线单位长度的电感、电容有关，而与线路长度无关。

29.基本措施是设置避雷针、避雷线、避雷器和接地装置。避雷针(线)可以防止雷电直接击中被保护物体，称为直击雷保护；避雷器可以防止沿输电线侵入变电所的雷电冲击波，称为侵入波保护；接地装置的作用是减少避雷针(线)或避雷器与大地之间的电阻值，达到降低雷电冲击电压幅值的目的。

30. 防雷的基本措施是设置避雷针、避雷线、避雷器和接地装置。避雷针(线)可以防止雷电直接击中被保护物体，称为直击雷保护；避雷器可以防止沿输电线侵

入变电所的雷电冲击波,称为侵入波保护;接地装置的作用是减少避雷针(线)或避雷器与大地之间的电阻值,达到降低雷电冲击电压幅值的目的。

六、计算题(每小题 10 分,共 20 分)

31.被试品的电容电流

$$I_c = \omega c U = 0.095(A) \approx 0.1(A)$$

则变压器的额定电流应不小于 0.1 (A)

变压器高压侧额定电压为 100kV

因此变压器的容量应不小于 $S = 100 \times 0.1 = 10(kVA)$

(若变压器的容量仅根据试验电压和试品电容来选择,即

$$S = \frac{2\pi f c_x U^2}{1000} = \frac{314 \times 0.0042 \times 72^2}{1000} \approx 6.8 \quad (kVA)$$

32. 1、解:电机允许承受的侵入波最大陡度为

$$\left[\frac{du_2}{dx} \right]_{\max} = 600 \div 3 = 200V/m$$

换算成时间波陡度为

$$\left[\frac{du_2}{dt} \right]_{\max} = \left[\frac{du_2}{dx} \right]_{\max} \cdot \frac{dx}{dt} = 200 \times 6 \times 10^7 = 12 \times 10^9 V/s$$

保护匝间绝缘所需要的电容值为

$$C = \frac{2U_0}{Z_1 \left[\frac{du_2}{dt} \right]_{\max}} = \frac{2 \times 2 \times 10^5}{50 \times 12 \times 10^9} = 0.66 \times 10^{-6} F = 0.66 \mu F$$

高电压技术冲刺试卷(5)参考答案

一、 选择题

1.B/C 2.D 3. C 4.D 5.B 6.C 7.A 8.C

二、 填空题

1. 热 2.极小 3.热游离 (热电离)

4.线路单位长度的电感和电容

5.低 6.提高 7.固体

8.接地极 (工作接地、保护接地、防雷接地、静电接地) 电流迅速注入大地、减小

(降低) 接地电阻

9. 3×10^8 M/S

三、 简答题

1. 波阻抗表示向同一方向传播的电压波和电流波之间比值的大小；电磁波通过波阻抗为 Z 的无损线路时，其能量以电磁能的形式储存于周围介质中，而不像通过电阻那样被消耗掉。

为了区别不同方向的行波， Z 的前面应有正负号。

如果导线上有前行波，又有反行波，两波相遇时，总电压和总电流的比值不再等于波阻抗

波阻抗的数值 Z 只与导线单位长度的电感 L_0 和电容

C_0 有关，与线路长度无关

2. 避雷针是明显高出被保护物体的金属支柱，其作用是吸引雷电击于自身，并将雷电流迅速泄入大地，从而使被保护物体免遭直接雷击。避雷针需有足够截面的接地引下线和良好的接地装置，以便将雷电流安全可靠地引入大地。

避雷线，通常又称架空地线，简称地线。避雷线的防雷原理与避雷针相同，主要用于输电线路的保护，也可用来保护发电厂和变电所。用于输电线路时，避雷线除了防止雷电直击导线外，同时还有分流作用，以减少流经杆塔入地的雷电流从而降低塔顶电位，避雷线对导线的耦合作用还可以降低导线上的感应雷过电压

3. 避雷器是专门用以限制线路传来的雷电过电压或操作过电压的一种防雷装置。

避雷器实质上是一种过电压限制器，与被保护的电气设备并联连接，当过电压出现并超过避雷器的放电电压时，避雷器先放电，从而限制了过电压的发展，使电气设备免遭过电压损坏。

4.耐雷水平：雷击线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值。措施：

- | | |
|--------------------|-----------------|
| (1) 架设避雷线 | (2) 降低杆塔接地电阻 |
| (3) 架设耦合地线 | (4) 采用不平衡绝缘方式 |
| (5) 采用中性点非有效接地方式 | (6) 装设避雷器 |
| (7) 加强绝缘 | (8) 装设自动重合闸 |

四、 综合题

1、解：设线路中单位长度的电感和对地电容分别为 Z_0 和 C_0 则波在线路上的波速

为 $\sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}}$ ----- (2 分)

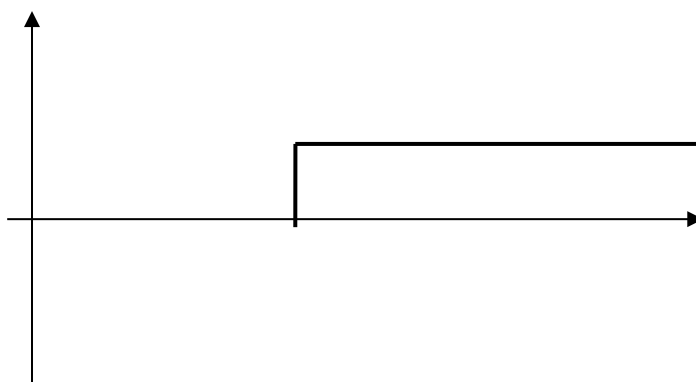
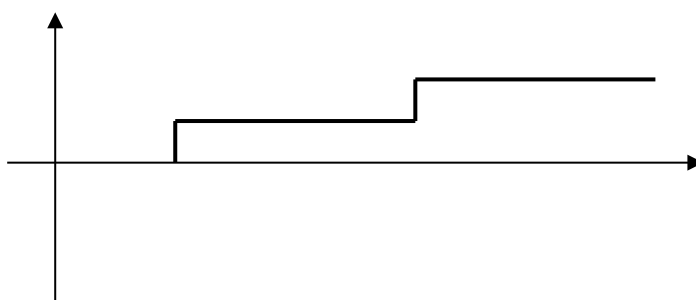
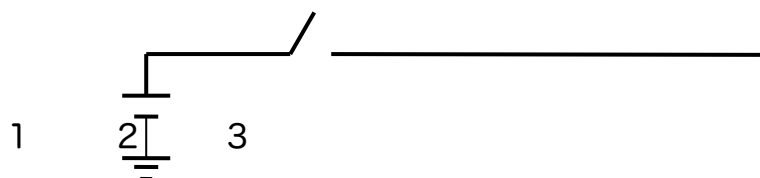
当 $t=0$ 合闸时，形成无限长直角波，幅值为 E 。

由于是空载线路，故波传输至末端时会产生电压全反射。

于是经过 $\frac{L}{2v}$ 的时间 $v_2 = E$,过 $\frac{L}{v}$ 时间到达 3 点。并形成全反射 ,此时 $v_3 = 2E$ 。

过 $\frac{L}{2v}$ 的时间 即 $t = \frac{3L}{2v}$ 时 , 2 点电压升为 $2E$ 。----- (6 分)

波形如图所示。----- (2 分)



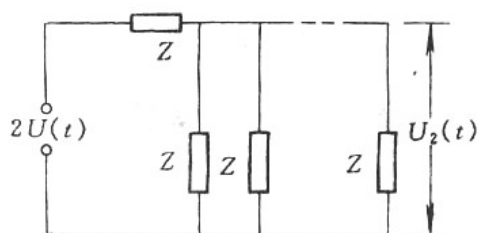
2. 解：

$$\therefore \begin{cases} v_A = v_{Ab} + v_{Af} \\ I_A = I_A + I_{Af} \\ Z = \frac{v_{Ab}}{I_{Ab}} = -\frac{v_{Af}}{I_{Af}} \end{cases} \quad \text{即} \quad \begin{cases} 900 = v_b + v_f \\ 1 = I_b + I_f \\ 400 = \frac{v_b}{I_b} \\ 400 = -\frac{v_f}{I_f} \end{cases} \quad \text{----- (5 分)}$$

$$\therefore \begin{cases} v_b = 650(KV) \\ v_f = 250(KV) \end{cases} \quad \text{----- (2 分)}$$

答：略----- (1 分)

3. 解：画出等效电路图 如图所示----- (4 分)



$$\text{总阻抗} = Z + \frac{Z}{n-1} = \frac{n}{n-1} Z$$

$$\text{母线电压} = \frac{\frac{Z}{n-1}}{\frac{n}{n-1} Z} \cdot 2U = \frac{2}{n} U = \frac{800}{n} (KV) \quad \text{----- (5 分)}$$

答：略----- (1 分)

4.解： $r_x = 15m$ $h_x = 10m$ ----- (2 分)

$$\therefore \begin{cases} r_x = (h - h_x)p & (h_x \geq \frac{h}{2} \text{时}) \\ r_x = (1.5h - 2h_x)p & (h_x < \frac{h}{2} \text{时}) \end{cases} \text{ ----- (4 分)}$$

设 $h \leq 30m$

则有： $\begin{cases} 15 = (h - 10) \times 1 \\ 15 = (1.5h' - 2 \times 10) \times 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h = 25(m) \\ h' = 23.33(m) \end{cases} \text{ ----- (2 分)}$

取 $h = 23.5 m$ ----- (1 分)

答：略。 ----- (1 分)