

高电压技术研究的主要对象是电气设备的绝缘、绝缘的测试和系统的过电压等。
在电力系统中，除了雷电过电压还有内部过电压。

第一部分 系统过电压

一. 雷电过电压——大气过电压

分类：直击雷过电压和感应雷过电压

1. 雷电的放电过程

1) 雷电放电是由雷云引起的放电现象。

2) 雷电放电自上而下发展的是下行雷，自下而上发展的是上行雷。

3) 放电的过程可以分为三个阶段：先导、主放电和余光放电。

先导：发展的速度慢，时间长，电流小（数十至数百安）、导电性良好。

主放电：比先导的速度要快得多，电流大（数十至数百千安）、时间短。

余光放电：时间长，电流小（数百安）

2. 防雷的设备

1) 避雷针和避雷线

目的：防止直击雷的过电压

分类：独立避雷针和构架避雷针。

原理：在避雷针（线）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引入大地。

应用：避雷针一般用于保护发电厂和变电站，避雷线主要用于保护线路，也可以用来保护变电站和发电厂。

保护范围：是按保护概率 99.9% 确定的。

当 $h_x \geq h/2$

$$R_x = (H - H_x) * p = H_a * p$$

R_x ——避雷针在 h_x 水平上的保护半径，m

H ——避雷针的高度，m

H_x ——被保护物体的高度，m

H_a ——避雷针的有效高度，m

P ——高度影响系数， $h \leq 30m$ ； $p=1$ ； $30 < h \leq 120m$ ， $p=5.5/h$

当 $h_x < h/2$ 时

$$R_x = (1.5h - 2h_x) * p$$

2). 避雷器

目的：防止行波过电压

种类：保护间隙；排气式避雷器；阀式避雷器；氧化锌避雷器。

残压的定义：是指雷电流通过避雷器时阀片电阻上产生的电压降。残压越低说明保护性能越好。

3) 接地装置

目的：减小接地电阻，以降低雷电流通过避雷针（线）或避雷器上的过电压。

分类：防雷接地、工作接地和保护接地。

工作接地：是根据电力系统正常运行的需要而进行的接地。接地电阻一般为 0.5~10 欧

保护接地：为了保证人身安全，而将高压电气设备的金属外壳接地。

防雷接地：是针对防雷保护的需要而设置的，目的是减小雷电流通过接地装置时的地电位升高。

3. 输电线路的防雷保护

1) 输电线路上的雷电过电压可以分为：直击雷过电压，是由雷电直接击中杆塔、避雷线或导线引起的过电压；感应过电压，是由雷击线路附近大地，由于电磁感应在导线上产生的过电压。

2) 雷击线路时线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值称为“耐雷水平”耐雷水平越高，线路的防雷性能越好。在实际工程中往往以降低杆塔接地电阻 R_i 和提高耦合系数 k 作为提高线路耐雷水平的主要手段。

3) 输电线路的防雷措施

目的：提高线路的耐雷水平，降低线路的雷击跳闸率

措施：架设避雷线（110kV 及以上的线路一般应沿全线架设避雷线，35kV 及以下的线路一般不沿全线架设避雷线，只在进线架设避雷线）、降低杆塔接地电阻、架设耦合地线、采用不平衡绝缘方式、采用消弧线圈接地方式、装设自动重合闸、加强绝缘、采用排气式避雷器。

4. 发电厂和变电站的防雷保护

避雷针的安防原则：全保护原则和防止反击

1) 独立避雷针

对于 35kV 及以下的配电装置，由于绝缘水平较低，为了避免反击的危险，应架设独立的避雷针，其接地装置与主接地网分开埋设

一般情况下 S_a 不小于 5m， S_e 不宜小于 3m。

2) 构架避雷针

为了确保变电站中最重要的绝缘又较弱的设备（主变压器绝缘），除了水力发电厂外，装设在架构（不包括变压器门型架构）上的避雷针与主接地网的地下连接点至变压器接地线与主接地网的地下连接点之间。沿接地体的长度不得小于 15m。

4) 防止变电站入侵波的保护

变电站中限制雷电入侵波过电压的主要措施是安装避雷器。变压器及其他高电压电气设备的绝缘水平就是依据阀式避雷器的特性而确定的。

5) 变电站的进线段保护

对未沿全线架设避雷线的 35~110kV 的线路，在进线段架设避雷线；对全线装设避雷线的线路，也将靠近变电站 1~2km 的线段列为进线段保护。

作用：雷击进线段线路时发生反击和绕击的概率大大减小，也可以防止或减少进线段内形成入侵波。降低变电站的入侵波陡度和幅值。

5. 变压器防雷保护

1) 三绕组变压器防雷保护

2) 自耦变压器的保护

3) 中性点的保护

4) 配电变压器的保护

二. 内部过电压

A. 操作过电压

常见的操作过电压：

空载线路分闸过电压（断路器分闸过程中的电弧重燃现象）；

措施：提高断路器的灭弧能力，加装并联电阻，利用避雷器来保护。

空载线路合闸过电压（有计划性合闸和自动重合闸，其中重合闸过电压是合闸过电压中较为严重的情况）；

措施：装设并联合闸电阻，单相自动重合闸的采用，同电位合闸，利用避雷器保护。

切除空载变压器过电压（断路器的截流）；

措施：安装磁吹阀式避雷器或氧化锌避雷器是限制切除空载变压器过电压的有效措施。

电弧接地过电压。

措施：采用中性点直接接地方式，采用中性点经消弧线圈接地，

B. 暂时过电压

1). 谐振过电压

线性谐振过电压，铁磁谐振过电压，参数谐振过电压。

2). 工频过电压

空载线路电容效应引起的工频电压升高（采用并联电抗器来限制）

不对称短路引起的工频电压升高（采用阀式避雷器和氧化锌避雷器）

发电机突然甩负荷引起的工频电压升高（在 330~500kV 超高电网中，采用并联电抗器或静止补偿

器来将工频电压升高限制到 $1.3 \sim 1.4$ 倍相电压以下)

三. 电力系统的绝缘配合

1. 中性点接地方式对绝缘水平的影响

有效接地和非有效接地。

2. 绝缘配合的原则

3 绝缘配合的惯用法

第二部分 绝缘的测试

一. 绝缘特性试验——非破坏性试验

1. 绝缘电阻和吸收比的测量

绝缘电阻为电介质电导的倒数, 按照电介质的等值电路, 测量绝缘电阻时应在绝缘上施加直流电源。现场普遍采用兆欧表来进行绝缘电阻的测量。

吸收比: 是指被试品加压 60s 时的绝缘电阻 R_{60s} 与加压 15s 时的绝缘电阻 R_{15s} 之比。(吸收比可以用来判断绝缘的状况, 对于绝缘良好的设备, 吸收比远大于 1, 但当绝缘受潮时, 吸收比接近或等于 1.)

测量绝缘电阻和吸收比才能发现绝缘中的贯穿性导电通道, 受潮, 表面脏污等缺陷, 当存在此类缺陷时, 绝缘电阻会显著降低; 但是不能发现绝缘中局部损伤, 裂缝, 分层脱开, 内部缺陷等, 因为兆欧表的电压较低, 对此类缺陷测量结果影响很小。

2. 泄漏电流的测量

与绝缘电阻的测量是类似的, 所用的直流电压较高, 能发现兆欧表测量绝缘电阻所不能发现的缺陷。

试验接线: 微安表接于高压侧——适用于绝缘一极接地; 微安表接于低压侧——绝缘两极都不能接地。

3. 介质损失角正切的测量

介质损失角正切是在交流电压作用下流过绝缘的有功电流分量与无功电流分量的比值, 是反映绝缘功率损耗大小的特性参数。

测量 $\tan \phi$ 能发现绝缘中存在的大面积分布性缺陷, 其中测量方法有: 用高压西林电桥测量, 用数字化介质损耗测量。

测量结果能对绝缘中存在的大面积分布性缺陷, 如绝缘普遍受潮、绝缘油或固体有机绝缘材料老化、穿透性导电通道、绝缘分层等; 但对绝缘中的个别局部的非贯穿性缺陷则不易被发现。

4. 局部放电的测量

局部放电是由绝缘局部区域内的绝缘弱点所造成的, 目前得到广泛应用的主要是电的测量方法, 接线方式是交流接线方式(并联法、串联法、平衡法)

二. 绝缘耐压试验——破坏性试验

1. 工频耐压试验

工频耐压试验是在电气设备上施加规定的工频试验电压并保持一定的时间, 以考核绝缘能否耐受该试验电压的试验。

工频耐压试验中, 加至规定的试验电压后, 一般要求持续 1min 的耐压时间。规定 1min 是为了便于观察被试品的情况, 使绝缘中危险的缺陷得以暴露出来, 同时也为了不致时间太长而引起不应有的绝缘损伤, 甚至使本来合格的绝缘产生热击穿。

试验变压器或其串联装置的输出电压必须是从零至额定电压之间连续可调, 所以要接入调压设备: 自耦调压器、移圈调压器、感应调压器、电动发电机组

工频高电压的测量：一种是低压侧测量而另一种是高压侧测量。低电压测量时用变比换算至高压侧，误差较大。高压侧测量有如下方法；

用静电电压表测量、用电容分压器配低压仪表测量、用球间隙测量、用高压电容器和整流装置串联测量、用电压互感器测量。

注意：升压必须从零开始。

2. 感应耐压试验

对某些带绕组的电气设备（如变压器、电抗器等），其绕组绝缘是分等级的，及绕组首段的绝缘水平要比中性点或接地端的高，这样就不能对整个绕组施加同样的试验电压。也就是说，要加上交流电压。

3. 直流耐压试验

对电缆、发电机等容量很大的电气设备，常用直流耐压试验来代替交流耐压试验（原因：用交流来试验需要大容量的试验设备，现场往往难以满足。直流耐压试验对有机绝缘的损伤远远小于交流试验损伤，而且，对于某些绝缘结构来说，直流耐压试验能发现工频耐压试验不易发现的缺陷。）

考虑到直流电压下绝缘中电压分布经较长的时间才能趋于稳定故直流耐压试验的时间要比工频耐压试验长一些，一般在 5min~10min。

直流高电压的测量方法：用静电电压表测量、用高压电阻与微安表串联测量、用球间隙测量。

4. 冲击耐压试验

电力系统中的高压电气设备除了承受长期的工作电压外，在运行过程中还可能承受雷电过电压和操作过电压的作用，冲击耐压试验就是用来检测高压电气设备对雷电冲击电压和操作冲击电压的耐受能力。在预防性试验中一般不进行冲击耐压试验，而是近似等价的 1min 工频耐压试验来代替。

冲击高电压的测量：用球间隙测量、用分压器测量系统测量。

第三部分 电气设备的绝缘

一、 气体

1. 在均匀电场中击穿

巴申定律的内容：当气体和电极材料一定时，气体的击穿电压是气体的相对密度和气隙距离乘积的函数。

汤逊理论：气体间隙较小的时候，击穿主要是由电子的碰撞游离和正离子撞击阴极表面造成的表面游离所引起的。

流注理论：电子的碰撞游离和空间光游离是形成自持放电的主要原因，空间电荷对电场的畸变作用是产生光游离的重要原因。

自持放电：不需要外界游离因素，靠电场本身就能维持的放电叫做自持放电点。

2. 不均匀电场中击穿

电晕放电：在极不均匀电场中，间隙的最大场强与平均场强相差很大。易产生自持放电，产生薄薄的淡紫色发光层，这就是电晕。发光层就是电晕层。电晕发生时还可以听到丝丝的放电声，并能闻到臭氧的气味。

极性效应：棒—板间隙中，棒的极性不同时，间隙的起晕电压和击穿电压各不相同，这种现象称为极性效应。

3. 持续电压下空气的击穿

4. 雷电冲击电压下空气的击穿

5. 操作冲击电压下空气的击穿

6. 提高气体放电击穿的方法

改善电极形状以改善电场分布

利用空间电荷改善电场分布

采用高气压

采用高电气强度气体

采用高真空

二、 液体

液体击穿主要有两种形式：电击穿和液体本身所含有的杂质引起的气泡击穿

影响因素：杂质、温度、电场的均匀程度、电压的作用时间、压力。

提高击穿电压的方法：减少液体电介质中的杂质（过滤、祛气、防潮），采用固体电介质降低杂质的影响（覆盖、绝缘层、屏障）

三、 固体

固体电介质击穿有电击穿、热击穿和电化学反应。

影响因素：电压作用时间、温度、电场均匀程度、电压的种类、累积效应、受潮、机械负荷。

提高固体击穿的方法：改进制造工艺、改进绝缘设计、改善运行条件。

