



高电压技术

屠幼萍

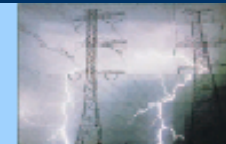
 +80795842, 13691145432

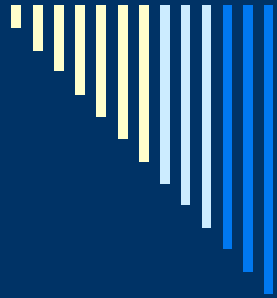
 typ@ncepu.edu.cn



华北电力大学
North China Electric Power University

高电压与电磁兼容技术研究所
High Voltage & Electromagnetic Compatibility Laboratory





第 17 讲

发电厂 / 变电所雷电防护

- 发、变电所雷电过电压来源及危害
- 发、变电所的直击雷防护
- 发、变电所的侵入波过电压防护

第一节 发、变电所雷电过电压来源及危害

- 雷电直击发电厂和变电所
- 雷击线路产生的雷电过电压沿线路侵入发、变电所
 - 220kV线路的50%放电电压为1200kV，而相应的变压器全波冲击试验电压850kV，全波多次冲击耐压只有 $850/1.1=773\text{kV}$
- 造成大面积停电，发电机、变压器等主要电器设备的内绝缘大都没有自恢复的能力
 - 高压输电线路允许每几年跳闸一次

发、变电站过电压防护的主要措施

直击 { 针, 线, 保护范围
防止反击

侵入波 { 避雷器的保护作用与范围
进行保护段 { 降低来波陡角(对 T_r)
减小通过避雷器的电流

侵入波过电压防护的主要措施

- 合理确定变电所内装设的避雷器的类型、参数和位置
- 进线段保护，限制流过避雷器的雷电流和降低侵入波陡度
- 变电所设备上的雷电过电压幅值限制在设备的雷电冲击耐受电压以下
- 直接与架空线相连的发电机（直配电机），除在电机母线上装设避雷器外，还应装设并联电容器降低电机绕组侵入波的陡度，保护电机匝间绝缘和纵向绝缘不受损坏

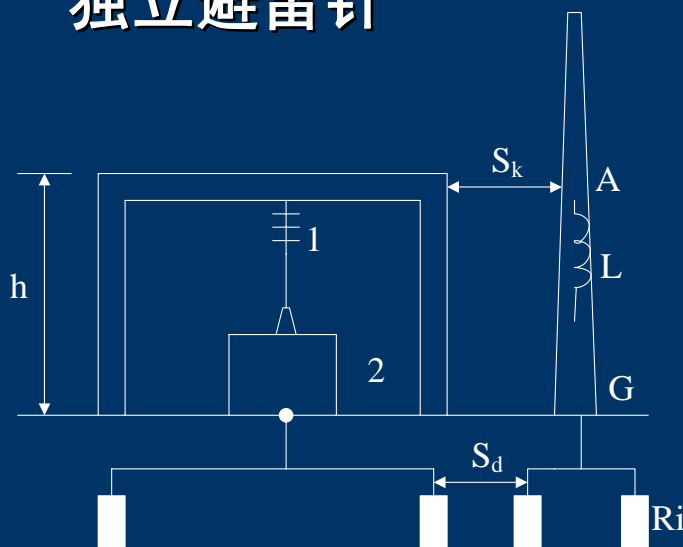
第2节 发、变电所的直击雷防护

■ 避雷针：独立避雷针、构架避雷针

使所有设备都处在避雷针保护范围内

防止雷击避雷针时的反击事故

独立避雷针



$$u_k = iR_{ch} + Lh \frac{di_L}{dt}$$

$$u_d = i_L R_{ch}$$

R_{ch} : 避雷针的冲击接地电阻

L : 避雷针的等值电感

第2节 发、变电所的直击雷防护

避雷针与被保护设备或构架之间的空气间隙 S_k ， $\geq 5\text{m}$

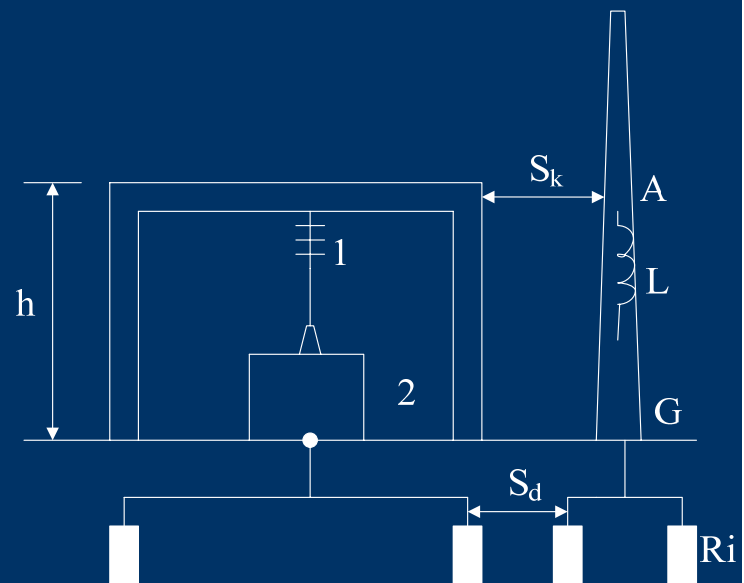
$$S_k > \frac{u_k}{E_k}$$

E_k ：平均耐电强度，约为 500kV/m

避雷针接地装置与被保护设备接地装置之间的空气间隙 S_d ， $\geq 3\text{m}$

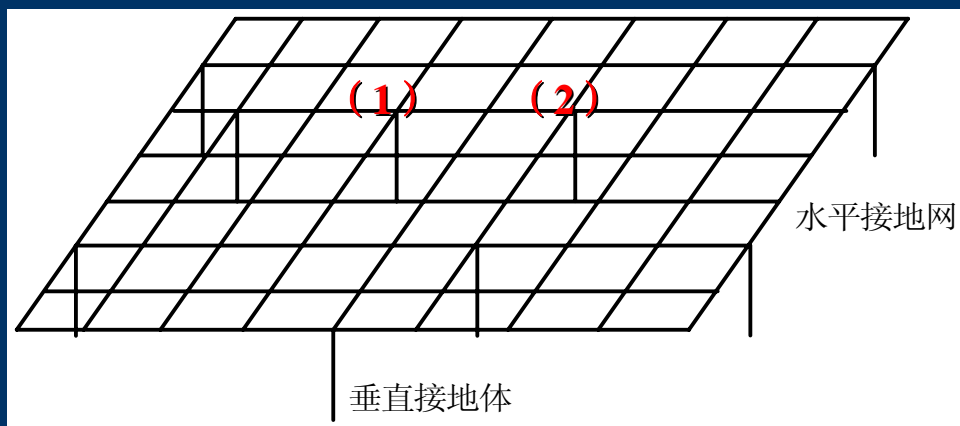
$$S_d > \frac{u_d}{E_d}$$

E_d ：土壤的耐电强度，约为 300kV/m



构架避雷针

- 110kV及以上，一般将避雷针架设在配电装置的构架上
- 高电位计算与独立避雷针相同，一般不会造成空气间隙的击穿事故
- 注意：配电构架应装设**辅助接地装置**，此装置与变电所**主接地网**的**连接点（1）**离主变压器接地装置与主接地网的**连接点（2）**之间的距离大于等于15m



电压波（高电位）沿接地网向变压器接地点传播的过程中衰减

第3节 发、变电所的侵入波过电压防护

■ 装设避雷器

正确选择避雷器（电气参数）

合理确定保护接线方式，如台数，装设位置

用尽量少的避雷器保护所有设备

➤ 避雷器安装在设备旁

变压器在冲击电压作用下可等值为一个电容（入口电容），一般可以不计及

避雷器动作前，变压器上（也是避雷器）电压：

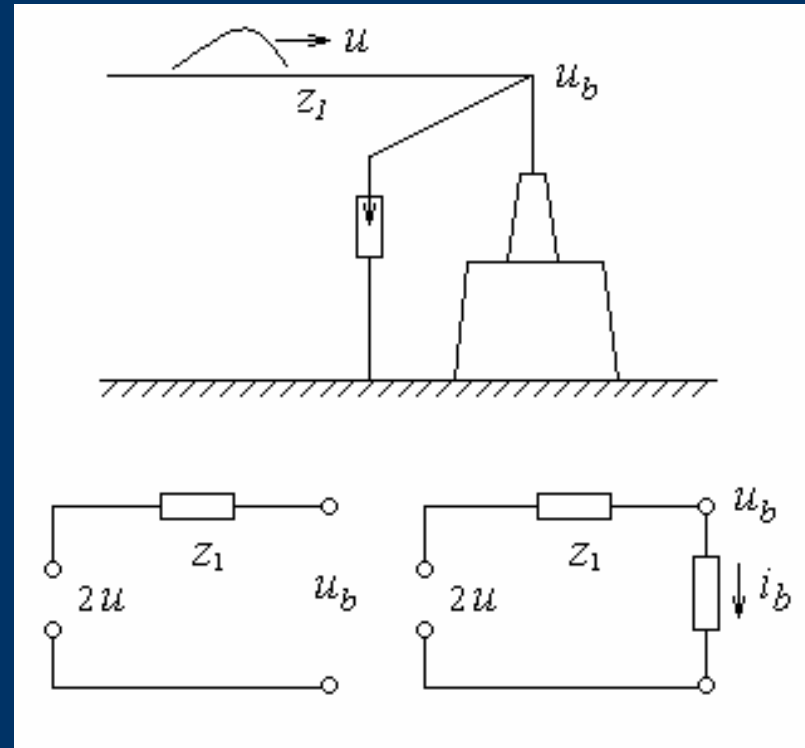
$$u_b = 2u$$

避雷器动作后，变压器上（也是避雷器）电压满足：

$$\left. \begin{aligned} 2u &= i_b Z_1 + u_b \\ u_b &= f(i_b) \end{aligned} \right\}$$

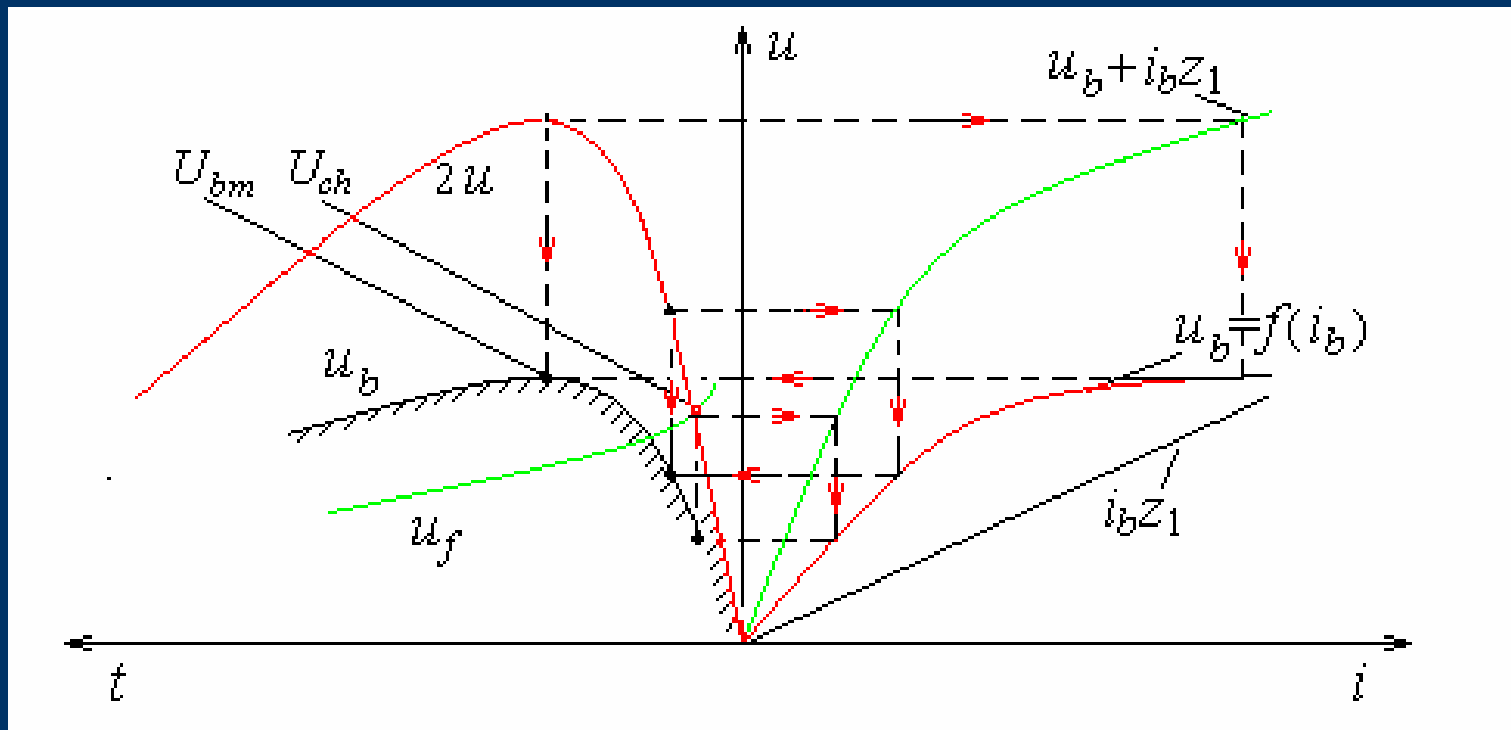


作图法求取变压器上的电压波形



作图法求解变压器上的电压

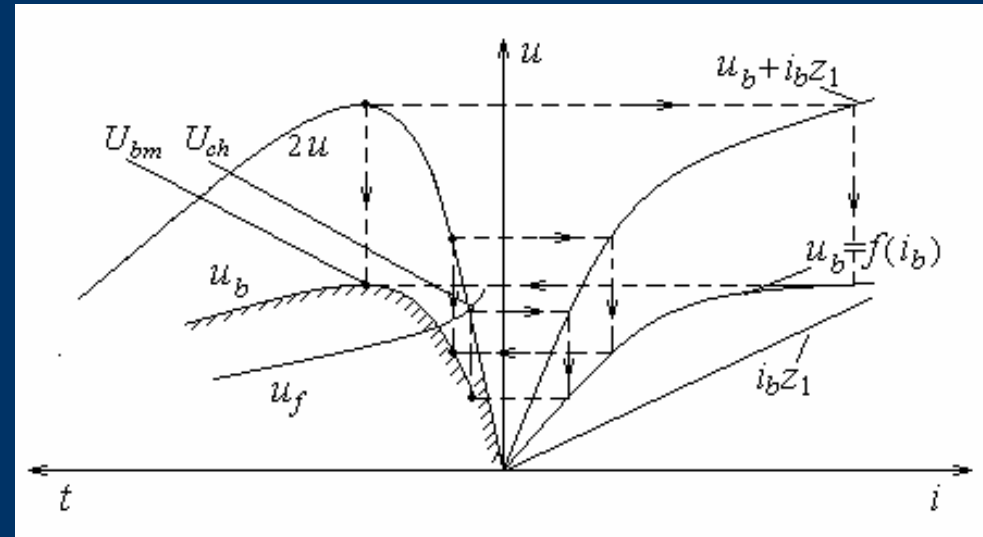
$$2u = i_b Z_1 + u_b \quad u_b = f(i_b)$$



变压器上电压有两个峰值：

U_{ch} ：避雷器冲击放电电压

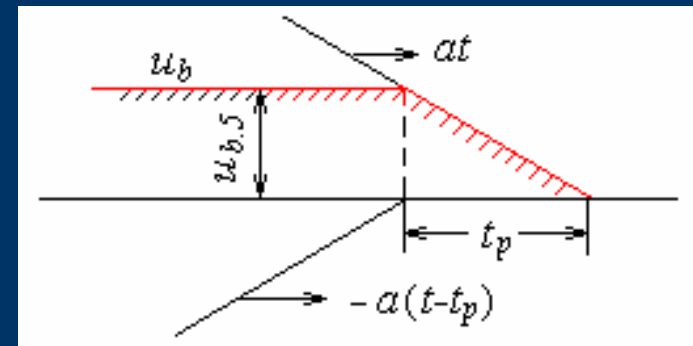
U_{bm} ：避雷器残压的最大值
取5kA下的数值



两个峰值 U_{ch} 和 U_{bm} 基本相同

变压器上电压近似为一斜角平顶波

变压器得到可靠保护条件：变压器冲击放电电压大于避雷器的冲击放电电压和5kA下的残压



t_p 为避雷器放电时刻

在避雷器安装处产生一负电压波 $-a(t-t_p)$

➤ 避雷器安装在距设备一定距离处

入侵波为一斜角波，用行波网格法求的各节点上的电压

避雷器上电压 $U_B(t)$ ：

1. 点 T 的反射波到达 A 点之前

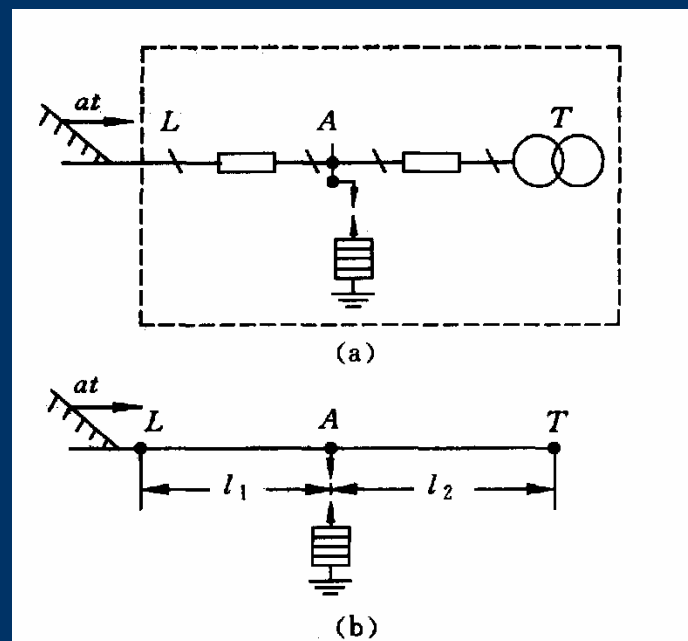
$$u_B(t) = a \cdot t$$

2. 点 T 的反射波到达 A 点后和避雷器动作前

$$u_B(t) = a \cdot t + a \left(t - \frac{2l_2}{v} \right) = 2a \left(t - \frac{l_2}{v} \right)$$

3. $t = t_p$ ($t_p > \frac{2l_2}{v}$) 时避雷器动作 ($u_B(t)$ 与伏秒特性相交)

$$u_B(t) = 2a \left(t - \frac{l_2}{v} \right) - 2a \left(t - t_p \right) = 2a \left(t_p - \frac{l_2}{v} \right)$$



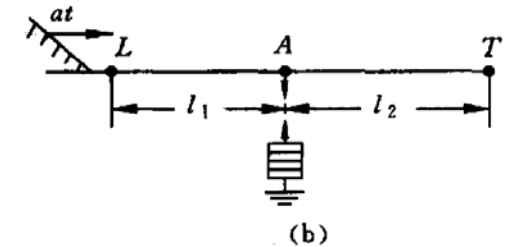
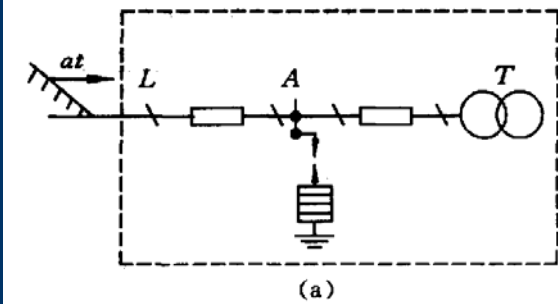
避雷器上电压 $U_B(t)$:

4. $t > t_p$ 避雷器动作后电压保持不变, 且

$$u_B(t) = 2a\left(t_p - \frac{l_2}{v}\right) = U_{b.5}$$

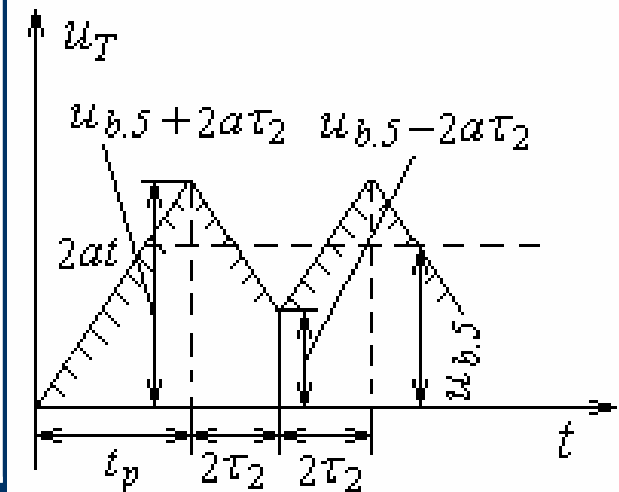
变压器上电压 $U_T(t)$:

$t < t_p$	$u_T(t) = 2at$
$t = t_p$	$u_T(t) = 2at_p = U_{b.5} + 2a\frac{l_2}{v}$
$t = t_p + \frac{2l_2}{v}$	$u_T(t) = 2a\left(t_p + \frac{2l_2}{v}\right) - 4a\left(t_p + \frac{2l_2}{v} - t_p\right)$ $= 2a\left(t_p - \frac{2l_2}{v}\right) = U_{b.5} - 2a\frac{l_2}{v}$
$t = t_p + \frac{4l_2}{v}$	$u_T(t) = 2at_p = U_{b.5} + 2a\frac{l_2}{v}$



具有振荡性质


-----截波



➤ 避雷器安装在距设备一定距离处

变压器上最大电压 U_T : $U_T = U_{b.5} + 2a \frac{l_2}{v}$

电气设备上最大值 U_S : $U_S = U_{b.5} + 2a \frac{l}{v}$


$$U_S = U_{b.5} + 2a \frac{l}{v} K$$

K 系数为考虑设备电容

变压器绝缘承受截波的能力----多次截波耐压值 $U_j = \frac{U_{j.3}}{1.15}$

$$U_j \leq U_s$$

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

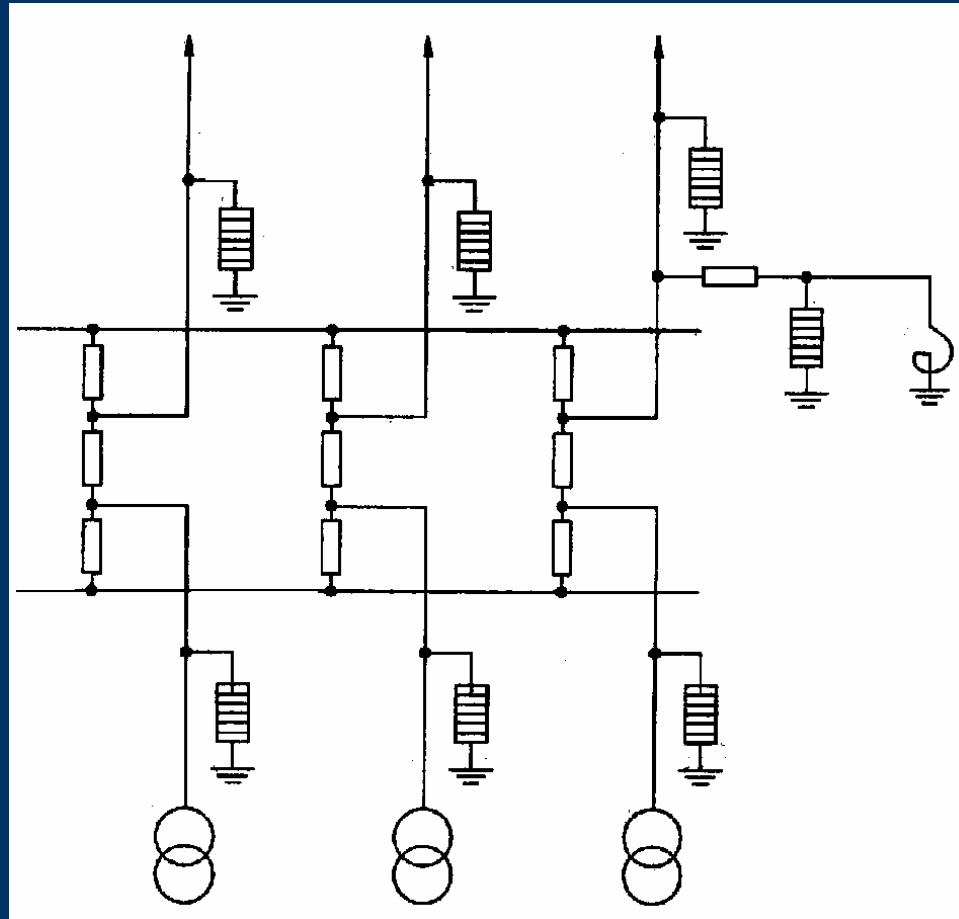
➤ 避雷器安装在距设备一定距离处

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

- 限制避雷器的残压，即流过避雷器的雷电流加以限制使之不大于5kV
- 限制侵入波的陡度
- 限制设备离开避雷器的电气距离

入侵波陡度为某一值时，变压器与避雷器之间的距离有一极限值（保护范围）

变电所的保护接线



500kV变电所保护接线

第3节 发、变电所的侵入波过电压防护

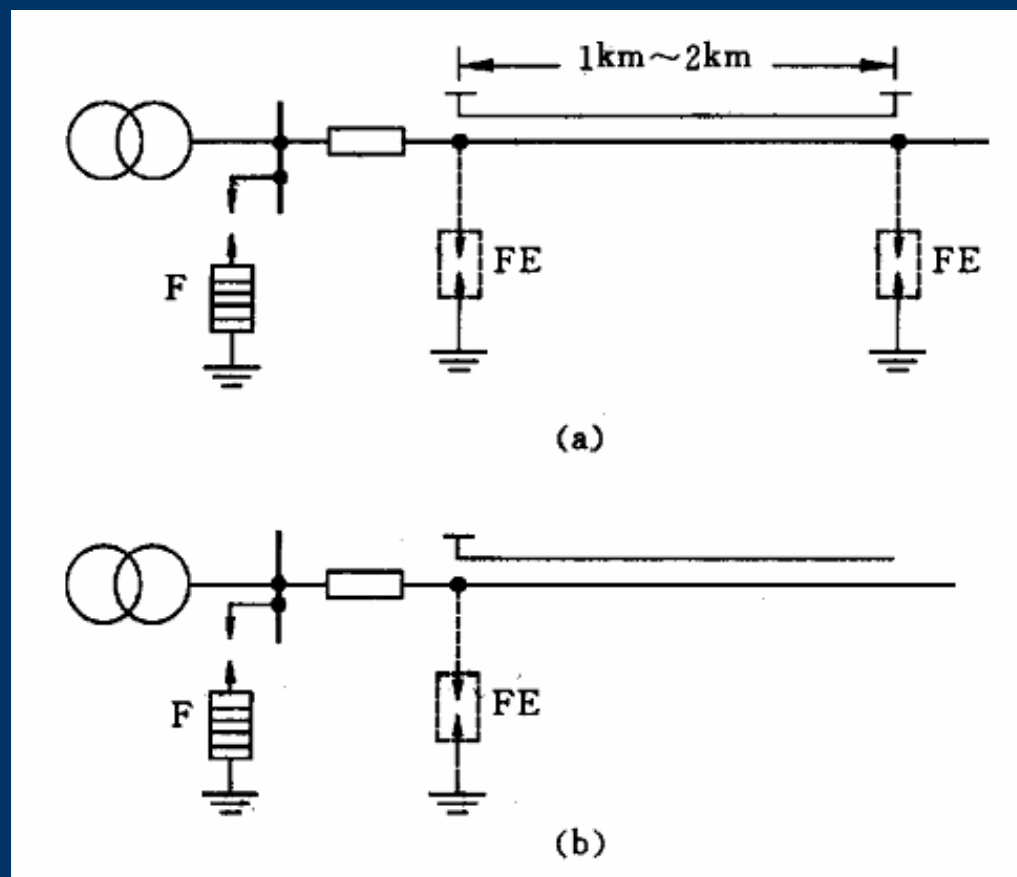
- 装设避雷器
- 进线段保护

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

- 限制避雷器的雷电流以降低残压
- 限制侵入波的陡度
- 1-2km的进线段加强雷电防护

■ 进线段保护

35kV及以上架空进线段的保护



■ 进线段保护

- 在进线段内雷绕击或反击而产生入侵波的机会很小

进线段耐雷水平

额定电压 kV	35	66	110	220	330	500
耐雷水平 kA	30	60	75	110	150	175

- 进线段外落雷，因进线段导线的波阻抗使流经避雷器的雷电流受到限制
- 进线段内导线上冲击电晕的影响使入侵波陡度和幅值下降

➤ 流经避雷器电流的计算

进线段首端落雷且最大幅值为 $U_{50\%}$

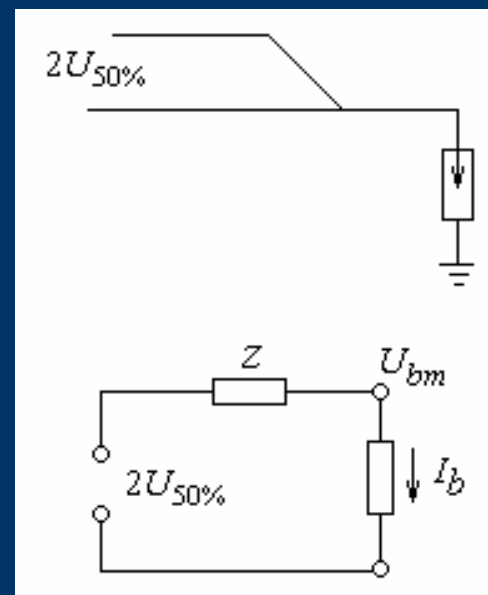
$$\frac{2l}{v} = 6.7 \sim 13.3 \mu s > \tau_f$$

τ_f 侵入波的波头时间

流经避雷器雷电流的最大值 I_b

$$2U_{50\%} = I_b z + U_{bm}$$

表10-3-2显示：进线段可以限制避雷器中电流不超过5kA
(或10kA)



➤ 进入变电所的雷电流陡度的计算

首端落雷且幅值为 $U_{50\%}$ 的直角波: $U_{50\%} \gg U_{起晕}$

冲击电晕使波形发生变形, 波头变缓, 进入变电所雷电波的陡度 a

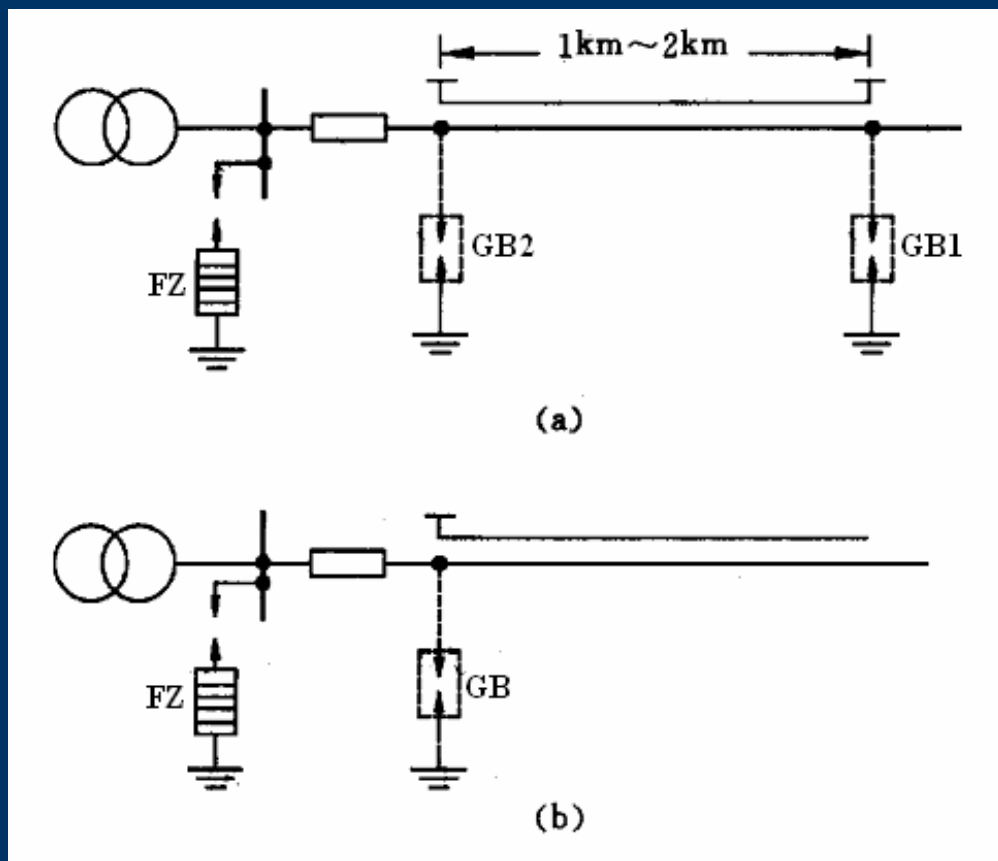
$$a = \frac{u}{\Delta\tau} = \frac{u}{(0.05 + \frac{0.008u}{h_d})l} \quad (\text{kV}/\mu\text{s})$$

计算用陡度 a'

$$a' = \frac{a}{v} = \frac{a}{300} \quad (\text{kV}/\text{m})$$

- 计算不同电压等级的 a' 后, 求出变电站电气设备离避雷器的最大允许电气距离 l_m

■ 进线段保护

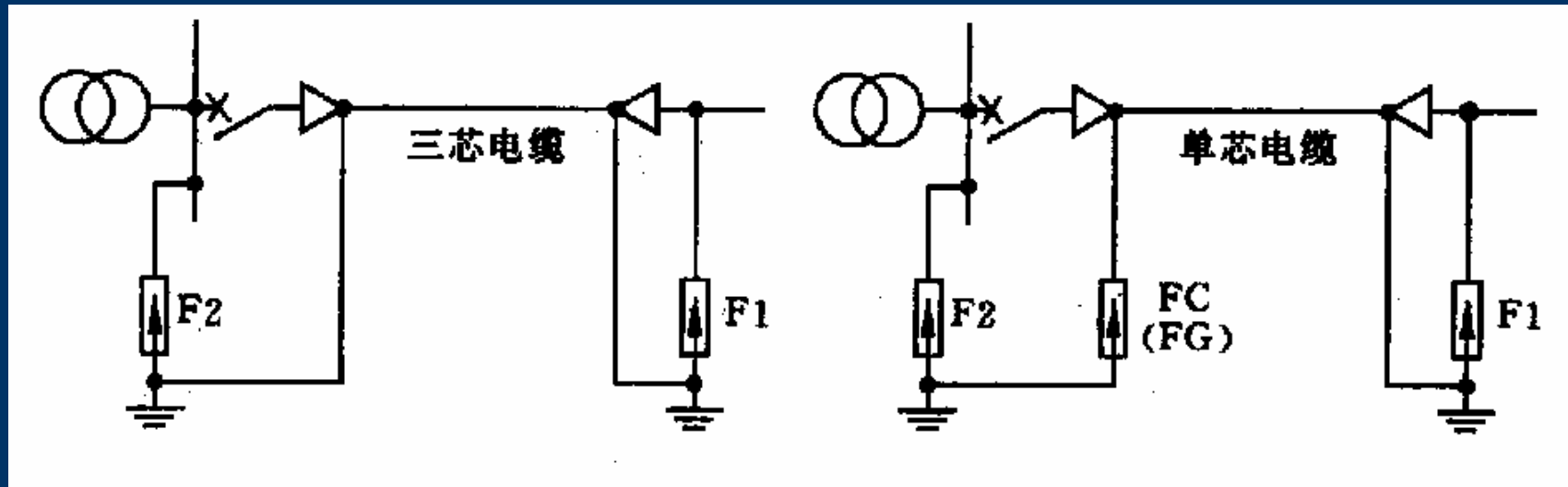


- 进线段首端装设一组管型避雷器GB1
- 靠近隔离开关或断路器处装设一组管型避雷器GB2。断路器壁和运行时，管型避雷器在避雷器的保护范围内

35kV及以上变电所的进线保护接线

(a) 未全线架设避雷线 (b) 全线架设避雷线

35kV及以上电缆进线段的保护



电缆与管型避雷器联合作用

原理见第七章[例7-8]: 电缆芯与外皮的耦合关系

■ 旋转电机的防雷保护

➤ 发电机、电动机、调相机

➤ 旋转电机的防雷保护特点

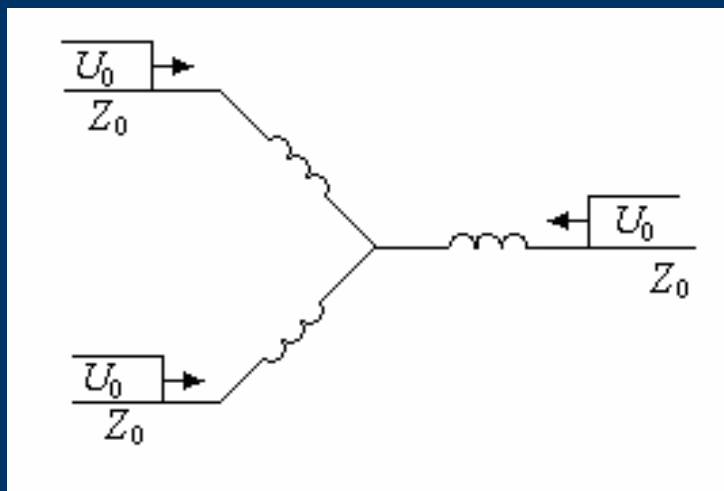
➤ 冲击绝缘强度在相同电压等级的电器设备中最低（固体绝缘、容易老化），且避雷器的保护水平与电机的绝缘水平之间的绝缘配合裕度很小

➤ 匝间绝缘要求将侵入波陡度限制到很低($<5\text{kV}/\mu\text{s}$)

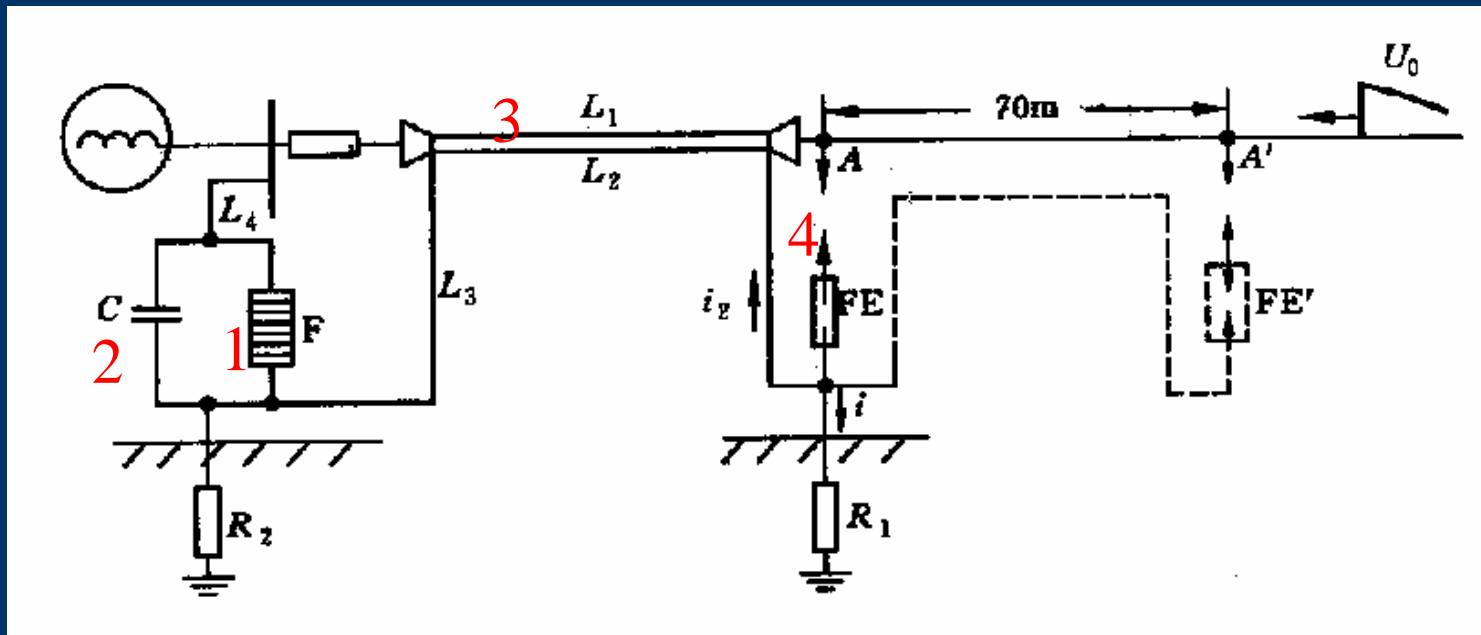
■ 旋转电机的防雷保护

➤ 旋转电机的防雷保护特点

- 发电机绕组的中性点不接地，在三相进波时，在直角头情况下，中性点电压达相端电压的两倍



要求将侵入波陡度限制在 $2\text{kV}/\mu\text{s}$ 以下，中性点电压不超过相端电压



- 在发电机母线上装设电容器，以限制侵入波陡度和降低感应过电压，保护匝间绝缘和中性点绝缘
- 在每台发电机出线处装设一组避雷器，以限制侵入波幅值，流经避雷器中雷电流小于3kA
- 进线段保护，电缆与管型避雷器联合作用