

## 前 言

本标准是根据原水利电力部 1979 年 1 月颁发的 SDJ 7—79《电力设备过电压保护设计技术规程》和 1984 年 3 月颁发的 SD 119—84《500 kV 电网过电压保护绝缘配合与电气设备接地暂行技术标准》，经合并、修订之后提出的。

本标准较修订前的两个标准有如下重要技术内容的改变：

- 1) 增补了电力系统电阻接地方式，修订了不接地系统接地故障电流的阈值；
- 2) 对暂时过电压和操作过电压保护，补充了有效接地系统偶然失地保护和并联补偿电容器组、电动机操作过电压保护及隔离开关操作引起的特快暂态过电压保护等内容，对 330 kV 系统提出新的操作过电压水平要求，修订了限制 500 kV 合闸和重合闸过电压的原则和措施等；
- 3) 增加了金属氧化物避雷器参数选择的要求；
- 4) 增加了变电所内金属氧化物避雷器最大保护距离和 SF<sub>6</sub>GIS 变电所的防雷保护方式的内容；
- 5) 充实并完善了 3 kV~500 kV 交流电气装置绝缘配合的原则和方法，给出架空线路、变电所绝缘子串、空气间隙和电气设备绝缘水平的推荐值。

本标准发布后，SDJ 7—79 即行废止；SD 119—84 除第六章 500 kV 电网电气设备接地外也予以废止。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 是标准的附录，附录 D、附录 E 和附录 F 是提示的附录。

本标准由电力工业部科学技术司提出。

本标准由电力工业部绝缘配合标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：电力工业部电力科学研究院高压研究所。

本标准起草人：杜澍春、陈维江。

本标准委托电力工业部电力科学研究院高压研究所负责解释。

## 1 范围

本标准规定了标称电压为 3 kV~500 kV 交流系统中电气装置过电压保护的方法和要求;提供了相对地、相间绝缘耐受电压或平均(50%)放电电压的选择程序,并给出了电气设备通常选用的耐受电压和架空送电线路与高压配电装置的绝缘子、空气间隙的推荐值。

## 2 定义

本标准采用下列定义。

### 2.1 电阻接地系统 resistance grounded system

系统中至少有一根导线或一点(通常是变压器或发电机的中性线或中性点)经过电阻接地。

注

- 1 高电阻接地的系统设计应符合  $R_0 \leq X_{C0}$  的准则,以限制由于电弧接地故障产生的瞬态过电压。一般采用接地故障电流小于 10 A。 $R_0$  是系统等值零序电阻, $X_{C0}$  是系统每相的对地分布容抗。
- 2 低电阻接地的系统为获得快速选择性继电保护所需的足够电流,一般采用接地故障电流为 100 A~1 000 A。对于一般系统,限制瞬态过电压的准则是  $(R_0/X_0) \geq 2$ 。其中  $X_0$  是系统等值零序感抗。

### 2.2 少雷区 less thunderstorm region

平均年雷暴日数不超过 15 的地区。

### 2.3 中雷区 middle thunderstorm region

平均年雷暴日数超过 15 但不超过 40 的地区。

### 2.4 多雷区 more thunderstorm region

平均年雷暴日数超过 40 但不超过 90 的地区。

### 2.5 雷电活动特殊强烈地区 Thunderstorm activity special strong region

平均年雷暴日数超过 90 的地区及根据运行经验雷害特殊严重的地区。

## 3 系统接地方式和运行中出现的各种电压

### 3.1 系统接地方式

3.1.1 110 kV~500 kV 系统应该采用有效接地方式,即系统在各种条件下应该使零序与正序电抗之比( $X_0/X_1$ )为正值并且不大于 3,而其零序电阻与正序电抗之比( $R_0/X_1$ )为正值并且不大于 1。

110 kV 及 220 kV 系统中变压器中性点直接或经低阻抗接地,部分变压器中性点也可不接地。

330 kV 及 500 kV 系统中不允许变压器中性点不接地运行。

3.1.2 3 kV~10 kV 不直接连接发电机的系统和 35 kV、66 kV 系统,当单相接地故障电容电流不超过下列数值时,应采用不接地方式;当超过下列数值又需在接地故障条件下运行时,应采用消弧线圈接地方式:

中华人民共和国电力工业部 1997-04-21 批准

1997-10-01 实施

- a) 3 kV~10 kV 钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统和所有 35 kV、66 kV 系统,10 A。
- b) 3 kV~10 kV 非钢筋混凝土或非金属杆塔的架空线路构成的系统,当电压为:
  - 1) 3 kV 和 6 kV 时,30 A;
  - 2) 10 kV 时,20 A。
- c) 3 kV~10 kV 电缆线路构成的系统,30 A。

3.1.3 3 kV~20 kV 具有发电机的系统,发电机内部发生单相接地故障不要求瞬时切机时,如单相接地故障电容电流不大于表 1 所示允许值时,应采用不接地方式;大于该允许值时,应采用消弧线圈接地方式,且故障点残余电流也不得大于该允许值。消弧线圈可装在厂用变压器中性点上,也可装在发电机中性点上。

表 1 发电机接地故障电流允许值

发电机额定电压 kV	发电机额定容量 MW	电 流 允 许 值 A	发电机额定电压 kV	发电机额定容量 MW	电 流 允 许 值 A
6.3	≤50	4	13.8~15.75	125~200	2
10.5	50~100	3	18~20	≥300	1

注:对额定电压为 13.8 kV~15.75 kV 的氢冷发电机为 2.5 A。

发电机内部发生单相接地故障要求瞬时切机时,宜采用高电阻接地方式。电阻器一般接在发电机中性点变压器的二次绕组上。

3.1.4 6 kV~35 kV 主要由电缆线路构成的送、配电系统,单相接地故障电容电流较大时,可采用低电阻接地方式,但应考虑供电可靠性要求、故障时瞬态电压、瞬态电流对电气设备的影响、对通信的影响和继电保护技术要求以及本地的运行经验等。

3.1.5 6 kV 和 10 kV 配电系统以及发电厂厂用电系统,单相接地故障电容电流较小时,为防止谐振、间歇性电弧接地过电压等对设备的损害,可采用高电阻接地方式。

3.1.6 消弧线圈的应用

- a) 消弧线圈接地系统,在正常运行情况下,中性点的长时间电压位移不应超过系统标称相电压的 15%。
- b) 消弧线圈接地系统故障点的残余电流不宜超过 10 A,必要时可将系统分区运行。消弧线圈宜采用过补偿运行方式。
- c) 消弧线圈的容量应根据系统 5~10 年的发展规划确定,并应按下式计算:

$$W = 1.35I_c \frac{U_n}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:W——消弧线圈的容量,kVA;  
I<sub>c</sub>——接地电容电流,A;  
U<sub>n</sub>——系统标称电压,kV。

- d) 系统中消弧线圈装设地点应符合下列要求:
  - 1) 应保证系统在任何运行方式下,断开一、二回线路时,大部分不致失去补偿。
  - 2) 不宜将多台消弧线圈集中安装在系统中的一处。
  - 3) 消弧线圈宜接于 YN,d 或 YN,yn,d 接线的变压器中性点上,也可接在 ZN,yn 接线的变压器中性点上。

接于 YN,d 接线的双绕组或 YN,yn,d 接线的三绕组变压器中性点上的消弧线圈容量,不应超过变压器三相总容量的 50%,并不得大于三绕组变压器的任一绕组的容量。

如需将消弧线圈接于 YN,yn 接线的变压器中性点,消弧线圈的容量不应超过变压器三相总容量的 20%,但不应将消弧圈接于零序磁通经铁芯闭路的 YN,yn 接线的变压器,如外铁型变压器或三台单

相变压器组成的变压器组。

4) 如变压器无中性点或中性点未引出,应装设专用接地变压器,其容量应与消弧线圈的容量相配合。

### 3.2 系统运行中出现于设备绝缘上的电压

#### 3.2.1 系统运行中出现于设备绝缘上的电压有:

- a) 正常运行时的工频电压;
- b) 暂时过电压(工频过电压、谐振过电压);
- c) 操作过电压;
- d) 雷电过电压。

#### 3.2.2 相对地暂时过电压和操作过电压的标么值如下:

- a) 工频过电压的  $1.0 \text{ p. u.} = U_m / \sqrt{3}$ ;
- b) 谐振过电压和操作过电压的  $1.0 \text{ p. u.} = \sqrt{2} U_m / \sqrt{3}$ 。

注:  $U_m$  为系统最高电压。

#### 3.2.3 系统最高电压的范围:

- a) 范围 I,  $3.6 \text{ kV} \leq U_m \leq 252 \text{ kV}$ ;
- b) 范围 II,  $U_m > 252 \text{ kV}$ 。

## 4 暂时过电压、操作过电压及保护

### 4.1 暂时过电压(工频过电压、谐振过电压)及保护

#### 4.1.1 工频过电压、谐振过电压与系统结构、容量、参数、运行方式以及各种安全自动装置的特性有关。

工频过电压、谐振过电压除增大绝缘承受电压外,还对选择过电压保护装置有重要影响。

a) 系统中的工频过电压一般由线路空载、接地故障和甩负荷等引起。对范围 II 的工频过电压,在设计时应结合实际条件加以预测。根据这类系统的特点,有时需综合考虑这几种因素的影响。

通常可取正常送电状态下甩负荷和在线路受端有单相接地故障情况下甩负荷作为确定系统工频过电压的条件。

对工频过电压应采取措施加以降低。一般主要采用在线路上安装并联电抗器的措施限制工频过电压。在线路上架设良导体避雷线降低工频过电压时,宜通过技术经济比较加以确定。系统的工频过电压水平一般不宜超过下列数值:

线路断路器的变电所侧	1.3 p. u.
线路断路器的线路侧	1.4 p. u.

b) 对范围 I 中的 110 kV 及 220 kV 系统,工频过电压一般不超过 1.3 p. u.; 3 kV~10 kV 和 35 kV~66 kV 系统,一般分别不超过  $1.1 \sqrt{3} \text{ p. u.}$  和  $\sqrt{3} \text{ p. u.}$ 。

应避免在 110 kV 及 220 kV 有效接地系统中偶然形成局部不接地系统,并产生较高的工频过电压。对可能形成这种局部系统、低压侧有电源的 110 kV 及 220 kV 变压器不接地的中性点应装设间隙。因接地故障形成局部不接地系统时该间隙应动作;系统以有效接地方式运行发生单相接地故障时间隙不应动作。间隙距离的选择除应满足这两项要求外,还应兼顾雷电过电压下保护变压器中性点标准分级绝缘的要求(参见 7.3.5)。

4.1.2 谐振过电压包括线性谐振和非线性(铁磁)谐振过电压,一般因操作或故障引起系统元件参数出现不利组合而产生。应采取防止措施,避免出现谐振过电压的条件;或用保护装置限制其幅值和持续时间。

a) 为防止发电机电感参数周期性变化引起的发电机自励磁(参数谐振)过电压,一般可采取下列防止措施:



1) 使发电机的容量大于被投入空载线路的充电功率;

2) 避免发电机带空载线路启动或避免以全电压向空载线路合闸;

3) 快速励磁自动调节器可限制发电机同步自励过电压。发电机异步自励过电压,仅能用速动过电压继电保护切机以限制其作用时间。

b) 应该采用转子上装设阻尼绕组的水轮发电机,以限制水轮发电机不对称短路或负荷严重不平衡时产生的谐振过电压。

4.1.3 范围Ⅱ的系统当空载线路上接有并联电抗器,且其零序电抗小于线路零序容抗时,如发生非全相运行状态(分相操动的断路器故障或采用单相重合闸时),由于线间电容的影响,断开相上可能发生谐振过电压。

上述条件下由于并联电抗器铁芯的磁饱和特性,有时在断路器操作产生的过渡过程激发下,可能发生以工频基波为主的铁磁谐振过电压。

在并联电抗器的中性点与大地之间串接一接地电抗器,一般可有效地防止这种过电压。该接地电抗器的电抗值宜按补偿并联电抗器所接线路的相间电容选择,同时应考虑以下因素:

a) 并联电抗器、接地电抗器的电抗及线路容抗的实际值与设计值的变异范围;

b) 限制潜供电流的要求;

c) 连接接地电抗器的并联电抗器中性点绝缘水平。

4.1.4 范围Ⅰ的系统中,当空载线路(或其上接有空载变压器时)由电源变压器断路器合闸、重合闸或由只带有空载线路的变压器低压侧合闸、带电线路末端的空载变压器合闸以及系统解列等情况下,如由这些操作引起的过渡过程的激发使变压器铁芯磁饱和、电感作周期性变化,回路等值电感在2倍工频下的电抗与2倍工频下线路入口容抗接近相等时,可能产生以2次谐波为主的高次谐波谐振过电压。

应尽量避免产生2次谐波谐振的运行方式、操作方式以及防止在故障时出现该种谐振的接线;确实无法避免时,可在变电所线路继电保护装置内增设过电压速断保护,以缩短该过电压的持续时间。

4.1.5 范围Ⅰ的系统中有可能出现下列谐振过电压:

a) 110 kV及220 kV系统采用带有均压电容的断路器开断连接有电磁式电压互感器的空载母线,经验算有可能产生铁磁谐振过电压时,宜选用电容式电压互感器。已装有电磁式电压互感器时,运行中应避免可能引起谐振的操作方式,必要时可装设专门消除此类铁磁谐振的装置。

b) 由单一电源侧用断路器操作中性点不接地的变压器出现非全相或熔断器非全相熔断时,如变压器的励磁电感与对地电容产生铁磁谐振,能产生2.0p.u.~3.0p.u.的过电压;有双侧电源的变压器在非全相分合闸时,由于两侧电源的不同步在变压器中性点上可出现接近于2.0p.u.的过电压,如产生铁磁谐振,则会出现更高的过电压。

c) 经验算如断路器操作中因操动机构故障出现非全相或严重不同期时产生的铁磁谐振过电压可能危及中性点为标准分级绝缘、运行时中性点不接地的110 kV及220 kV变压器的中性点绝缘,宜在中性点装设间隙,对该间隙的要求与4.1.1b)同。在操作过程中,应先将变压器中性点临时接地。

有单侧电源的变压器,如另一侧带有同期调相机或较大的同步电动机,也类似有双侧电源的情况。

d) 3 kV~66 kV不接地系统或消弧线圈接地系统偶然脱离消弧线圈的部分,当连接有中性点接地的电磁式电压互感器的空载母线(其上带或不带空载短线路),因合闸充电或在运行时接地故障消除等原因的激发,使电压互感器过饱和则可能产生铁磁谐振过电压。为限制这类过电压,可选取下列措施:

1) 选用励磁特性饱和点较高的电磁式电压互感器。

2) 减少同一系统中电压互感器中性点接地的数量,除电源侧电压互感器高压绕组中性点接地外,其它电压互感器中性点尽可能不接地。

3) 个别情况下,在10 kV及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路以减少 $X_{C0}$ ,使 $X_{C0} < 0.01X_m$ 。

注: $X_m$ 为电压互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗。

4) 在互感器的开口三角形绕组装设  $R_{\Delta} \leq 0.4(X_m/K_{13}^2)$  的电阻 ( $K_{13}$  为互感器一次绕组与开口三角形绕组的变比) 或装设其它专门消除此类铁磁谐振的装置。

5) 10 kV 及以下互感器高压绕组中性点经  $R_{p.n} \geq 0.06X_m$  (容量大于 600 W) 的电阻接地。

4.1.6 3 kV~66 kV 不接地及消弧线圈接地系统, 应采用性能良好的设备并提高运行维护水平, 以避免在下述条件下产生铁磁谐振过电压:

- a) 配电变压器高压绕组对地短路;
- b) 送电线路一相断线且一端接地或不接地。

4.1.7 有消弧线圈的较低电压系统, 应适当选择消弧线圈的脱谐度, 以便避开谐振点; 无消弧线圈的较低电压系统, 应采取增大其对地电容等措施 (如安装电力电容器等), 以防止零序电压通过电容, 如变压器绕组间或两条架空线路间的电容耦合, 由较高电压系统传递到中性点不接地的较低电压系统, 或由较低电压系统传递到较高电压系统, 或回路参数形成串联谐振条件, 产生高幅值的转移过电压。

## 4.2 操作过电压及保护

### 4.2.1 线路合闸和重合闸过电压

空载线路合闸时, 由于线路电感—电容的振荡将产生合闸过电压。线路重合时, 由于电源电势较高以及线路上残余电荷的存在, 加剧了这一电磁振荡过程, 使过电压进一步提高。

a) 范围 II 中, 线路合闸和重合闸过电压对系统中设备绝缘配合有重要影响, 应该结合系统条件预测空载线路合闸、单相重合闸和成功、非成功的三相重合闸 (如运行中使用) 的相对地和相间过电压。

预测这类操作过电压的条件如下:

1) 对于发电机—变压器—线路单元接线的空载线路合闸, 线路合闸后, 电源母线电压为系统最高电压; 对于变电所出线则为相应运行方式下的实际母线电压。

2) 成功的三相重合闸前, 线路受端曾发生单相接地故障; 非成功的三相重合闸时, 线路受端有单相接地故障。

b) 空载线路合闸、单相重合闸和成功的三相重合闸 (如运行中使用), 在线路上产生的相对地统计过电压, 对 330 kV 和 500 kV 系统分别不宜大于 2.2p.u. 和 2.0p.u.。

c) 限制这类过电压的最有效措施是在断路器上安装合闸电阻。对范围 II, 当系统的工频过电压符合 4.1.1 要求且符合以下参考条件时, 可仅用安装于线路两端 (线路断路器的线路侧) 上的金属氧化物避雷器 (MOA) 将这类操作引起的线路的相对地统计过电压限制到要求值以下。这些参考条件是:

1) 发电机—变压器—线路单元接线时的参考条件见表 2。

表 2 仅用 MOA 限制合闸、重合闸过电压的条件

系统标称电压 kV	发电机容量 MW	线路长度 km	系统标称电压 kV	发电机容量 MW	线路长度 km
330	200	<100	500	200	<100
	300	<200		300	<150
				$\geq 500$	<200

2) 系统中变电所出线时的参考条件

330 kV      <200 km  
500 kV      <200 km

在其他条件下, 可否仅用金属氧化物避雷器限制合闸和重合闸过电压, 需经校验确定。

d) 范围 I 的线路合闸和重合闸过电压一般不超过 3.0p.u., 通常无需采取限制措施。

### 4.2.2 空载线路分闸过电压

空载线路开断时, 如断路器发生重击穿, 将产生操作过电压。

a) 对范围 I 的线路断路器, 应要求在电源对地电压为 1.3p.u. 条件下开断空载线路不发生重击穿。

b) 对范围 I, 110 kV 及 220 kV 开断架空线路该过电压不超过 3.0p.u.; 开断电缆线路可能超过

3.0p.u.。

为此,开断空载架空线路宜采用不重击穿的断路器;开断电缆线路应该采用不重击穿的断路器。

c)对范围Ⅰ,66 kV 及以下系统中,开断空载线路断路器发生重击穿时的过电压一般不超过 3.5p.u.。开断前系统已有单相接地故障,使用一般断路器操作时产生的过电压可能超过 4.0p.u.。为此,选用操作断路器时,应该使其开断空载线路过电压不超过 4.0p.u.。

#### 4.2.3 线路非对称故障分闸和振荡解列过电压

系统送受端联系薄弱,如线路非对称故障导致分闸,或在系统振荡状态下载列,特产生线路非对称故障分闸或振荡解列过电压。

对范围Ⅱ的线路,宜对这类过电压进行预测。预测前一过电压的条件,可选线路受端存在单相接地故障,分闸时线路送受端电势功角差应按实际情况选取。

当过电压超过 4.2.1b)所列数值时,可用安装在线路两端的金属氧化物避雷器加以限制。

#### 4.2.4 隔离开关操作空载母线的过电压

隔离开关操作空载母线时,由于重击穿将会产生幅值可能超过 2.0p.u.、频率为数百千赫至兆赫的高频振荡过电压。这对范围Ⅱ的电气装置有一定危险。为此,宜符合以下要求:

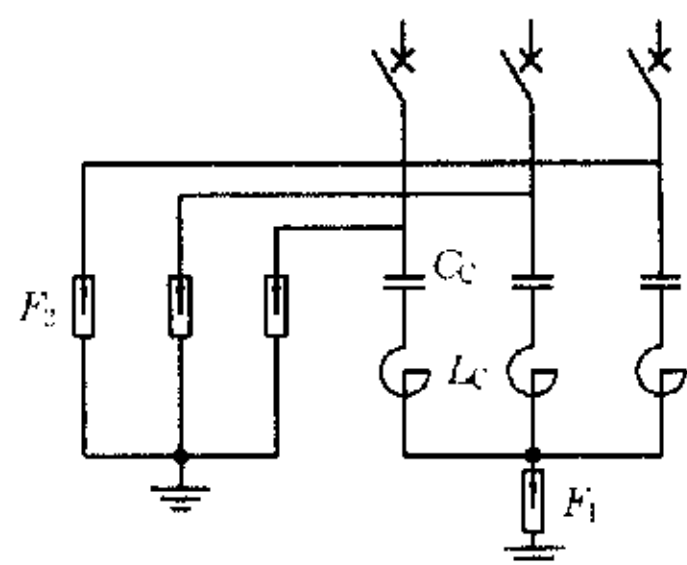
a) 隔离开关操作由敞开式配电装置构成的变电所空载母线时的过电压,可能使电流互感器一次绕组进出线之间的套管闪络放电,宜采用金属氧化物避雷器对其加以保护。

b) 隔离开关操作气体绝缘全封闭组合电器(GIS)变电所的空载母线时,会产生频率更高的过电压,它可能对匝间绝缘裕度不高的变压器构成威胁。为此,宜对采用的操作方式加以校核,尽量避免可能引起危险的操作方式。

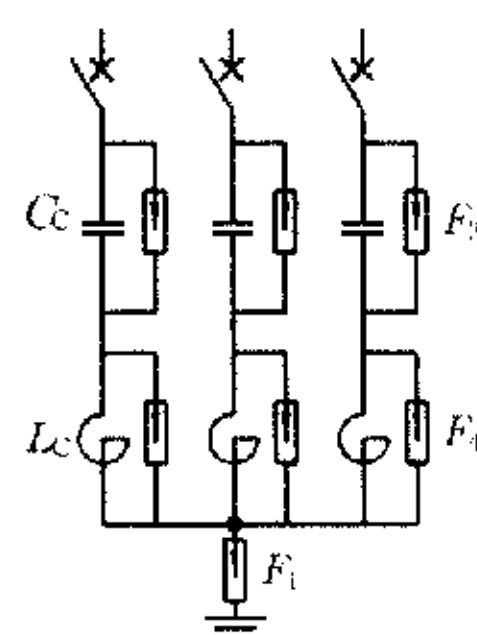
4.2.5 3 kV~66 kV 系统开断并联电容补偿装置如断路器发生单相重击穿时,电容器高压端对地过电压可能超过 4.0p.u.。开断前电源侧有单相接地故障时,该过电压将更高。开断时如发生两相重击穿,电容器极间过电压可能超过  $2.5\sqrt{2}U_{n,c}$ 。

操作并联电容补偿装置,应采用开断时不重击穿的断路器。对于需频繁投切的补偿装置,宜按图 1 (a)装设并联电容补偿装置金属氧化物避雷器(F1 或 F2),作为限制单相重击穿过电压的后备保护装置。在电源侧有单相接地故障不要求进行补偿装置开断操作的条件下,宜采用 F1。断路器操作频繁且开断时可能发生重击穿或者合闸过程中触头有弹跳现象时,宜按图 4.1(b)装设并联电容补偿装置金属氧化物避雷器(F1 及 F3 或 F4)。F3 或 F4 用以限制两相重击穿时在电容器极间出现的过电压。当并联电容补偿装置电抗器的电抗率不低于 12%时,宜采用 F4。

注:  $U_{n,c}$  为电容器的额定电压。



(a) 单相重击穿过电压的保护接线



(b) 单、两相重击穿过电压的保护接线

图 1 并联电容补偿装置的避雷器保护接线

#### 4.2.6 操作空载变压器和并联电抗器等的过电压

a) 开断空载变压器由于断路器强制熄弧(截流)产生的过电压,与断路器型式、变压器铁芯材料、绕组型式、回路元件参数和系统接地方式等有关。

当开断具有冷轧硅钢片的变压器时,过电压一般不超过 2.0p.u.,可不采取保护措施。



开断具有热轧硅钢片铁芯的 110 kV 及 220 kV 变压器的过电压一般不超过 3.0p.u.; 66 kV 及以下变压器一般不超过 4.0p.u.。

采用熄弧性能较强的断路器开断激磁电流较大的变压器以及并联电抗补偿装置产生的高幅值过电压,可在断路器的非电源侧装设阀式避雷器加以限制。保护变压器的避雷器可装在其高压侧或低压侧。但高低压侧系统接地方式不同时,低压侧宜装设操作过电压保护水平较低的避雷器。

b) 在可能只带一条线路运行的变压器中性点消弧线圈上,宜用阀式避雷器限制切除最后一条线路两相接地故障时,强制开断消弧线圈电流在其上产生的过电压。

c) 空载变压器和并联电抗补偿装置合闸产生的操作过电压一般不超过 2.0p.u.,可不采取保护措施。

4.2.7 在开断高压感应电动机时,因断路器的截流、三相同步开断和高频重复重击穿等会产生过电压(后两种仅出现于真空断路器开断时)。过电压幅值与断路器熄弧性能、电动机和回路元件参数等有关。开断空载电动机的过电压一般不超过 2.5p.u.。开断启动过程中的电动机时,截流过电压和三相同步开断过电压可能超过 4.0p.u.,高频重复重击穿过电压可能超过 5.0p.u.。采用真空断路器或采用的少油断路器截流值较高时,宜在断路器与电动机之间装设旋转电机金属氧化物避雷器或 R-C 阻容吸收装置。

高压感应电动机合闸的操作过电压一般不超过 2.0p.u.,可不采取保护措施。

4.2.8 66 kV 及以下系统发生单相间歇性电弧接地故障时,可产生过电压,过电压的高低随接地方式不同而异。一般情况下最大过电压不超过下列数值:

不接地	3.5p.u.
消弧线圈接地	3.2p.u.
电阻接地	2.5p.u.

具有限流电抗器、电动机负荷,且设备参数配合不利的 3 kV~10 kV 某些不接地系统,发生单相间歇性电弧接地故障时,可能产生危及设备相间或相对地绝缘的过电压。对这种系统根据负荷性质和工程的重要程度,可进行必要的过电压预测,以确定保护方案。

4.2.9 采用无间隙金属氧化物避雷器限制各类操作过电压时,其持续运行电压和额定电压不应低于表 3 所列数值。避雷器应能承受操作过电压作用的能量。

4.2.10 为监测范围 II 系统运行中出现的工频过电压、谐振过电压和操作过电压,宜在变电所安装过电压波形或幅值的自动记录装置,并妥为收集实测结果。

## 5 雷电过电压和保护装置

### 5.1 雷电过电压

5.1.1 设计和运行中应考虑直接雷击、雷电反击和感应雷电过电压对电气装置的危害。

5.1.2 架空线路上的雷电过电压:

a) 距架空线路  $S > 65$  m 处,雷云对地放电时,线路上产生的感应过电压最大值可按式(2)计算:

$$U_i \approx 25 \frac{I h_c}{S} \dots\dots\dots (2)$$

式中:  $U_i$ ——雷击大地时感应过电压最大值, kV;

$I$ ——雷电流幅值(一般不超过 100), kA;

$h_c$ ——导线平均高度, m;

$S$ ——雷击点与线路的距离, m。

线路上的感应过电压为随机变量,其最大值可达 300 kV~400 kV,一般仅对 35 kV 及以下线路的绝缘有一定威胁。

b) 雷击架空线路导线产生的直击雷过电压,可按式(3)确定:



$$U_s \approx 100I \dots\dots\dots (3)$$

式中： $U_s$ ——雷击点过电压最大值，kV。

雷直击导线形成的过电压易导致线路绝缘闪络。架设避雷线可有效地减少雷直击导线的概率。

c) 因雷击架空线路避雷线、杆顶形成作用于线路绝缘的雷电反击过电压，与雷电参数、杆塔型式、高度和接地电阻等有关。

宜适当选取杆塔接地电阻，以减少雷电反击过电压的危害。

5.1.3 发电厂和变电所内的雷电过电压来自雷电对配电装置的直接雷击、反击和架空进线上出现的雷电侵入波。

a) 应该采用避雷针或避雷线对高压配电装置进行直击雷保护并采取措施防止反击。

b) 应该采取措施防止或减少发电厂和变电所近区线路的雷击闪络并在厂、所内适当配置阀式避雷器以减少雷电侵入波过电压的危害。

c) 按本标准要求的采用的雷电侵入波过电压保护方案校验时，校验条件为保护接线一般应该保证2 km 外线路导线上出现雷电侵入波过电压时，不引起发电厂和变电所电气设备绝缘损坏。

5.2 避雷针和避雷线

5.2.1 单支避雷针的保护范围(图 2)。

a) 避雷针在地面上的保护半径，应按式(4)计算：

$$r = 1.5hP \dots\dots\dots (4)$$

式中： $r$ ——保护半径，m；

$h$ ——避雷针的高度，m；

$P$ ——高度影响系数， $h \leq 30$  m， $P = 1$ ； $30$  m  $< h \leq 120$  m， $P = \frac{5.5}{\sqrt{h}}$ ；当  $h > 120$  m 时，取其等于120 m。

b) 在被保护物高度  $h_x$  水平面上的保护半径应按下列方法确定：

1) 当  $h_x \geq 0.5h$  时，

$$r_x = (h - h_x)P = h_xP \dots\dots\dots (5)$$

式中： $r_x$ ——避雷针在  $h_x$  水平面上的保护半径，m；

$h_x$ ——被保护物的高度，m；

$h$ ——避雷针的有效高度，m。

2) 当  $h_x < 0.5h$  时，

$$r_x = (1.5h - 2h_x)P \dots\dots\dots (6)$$

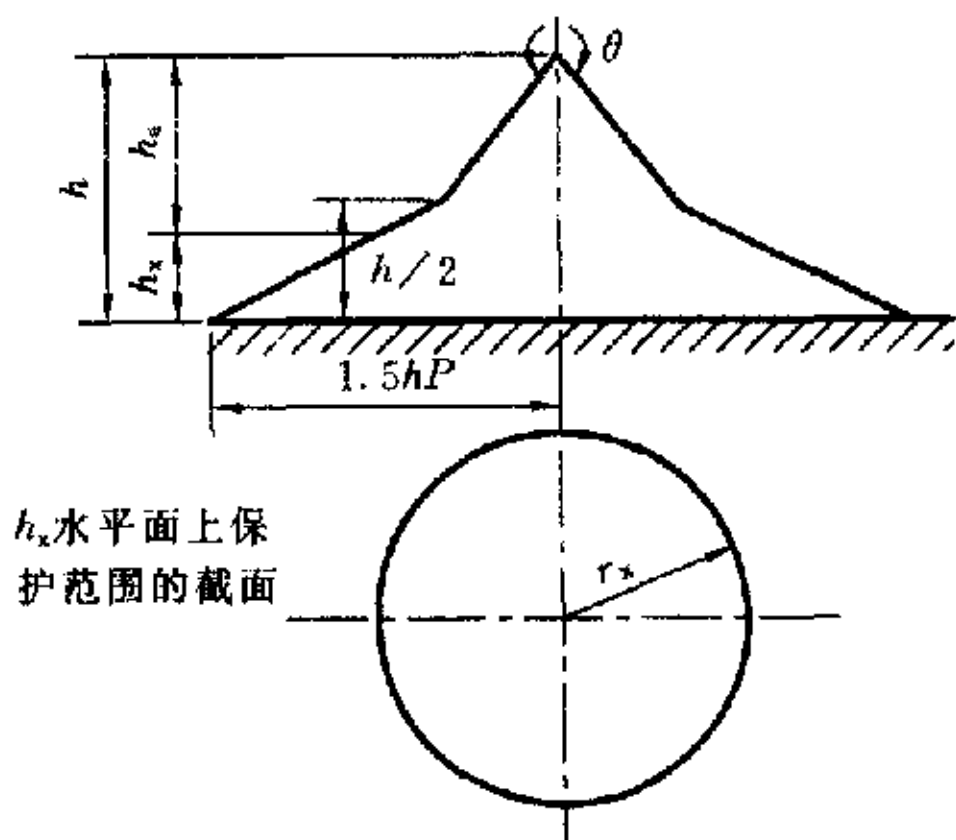


图 2 单支避雷针的保护范围( $h \leq 30$  m 时， $\theta = 45^\circ$ )

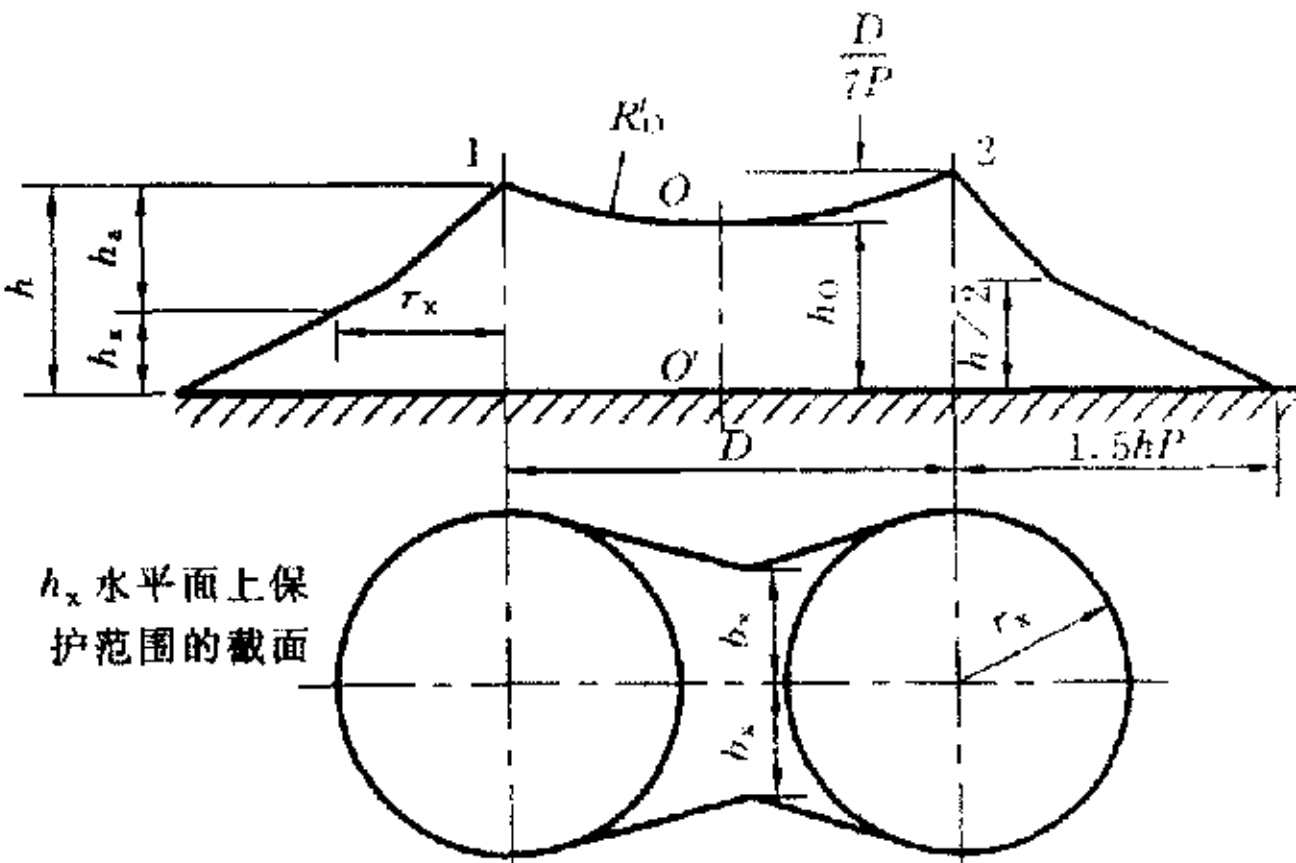


图 3 高度为  $h$  的两等高避雷针的保护范围

5.2.2 两支等高避雷针的保护范围(图 3)。

a) 两针外侧的保护范围应按单支避雷针的计算方法确定。

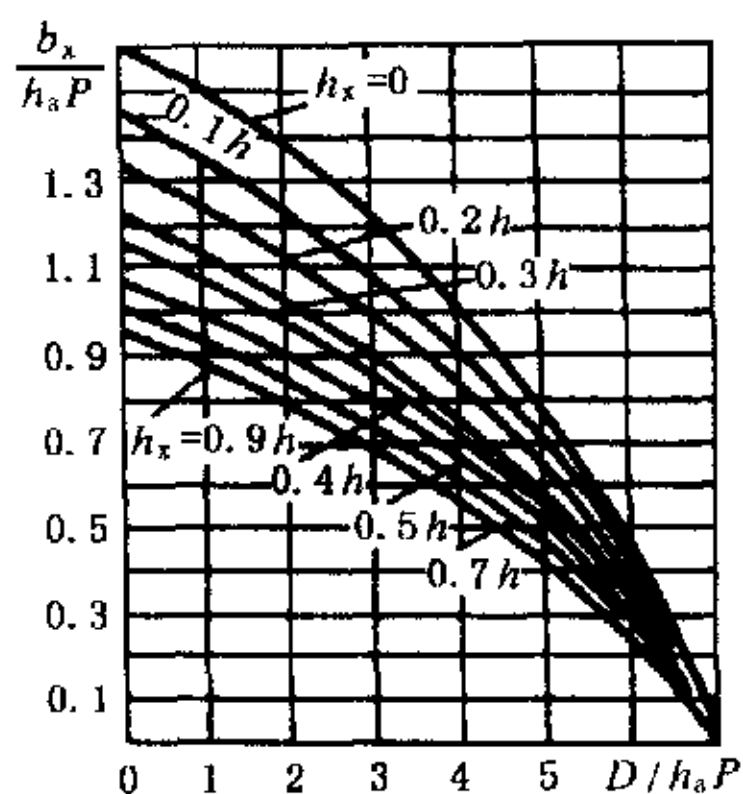
b) 两针间的保护范围应按通过两针顶点及保护范围上部边缘最低点 O 的圆弧确定, 圆弧的半径为  $R'_O$ 。O 点为假想避雷针的顶点, 其高度应按式(7)计算:

$$h_0 = h - \frac{D}{7P} \quad \dots\dots\dots (7)$$

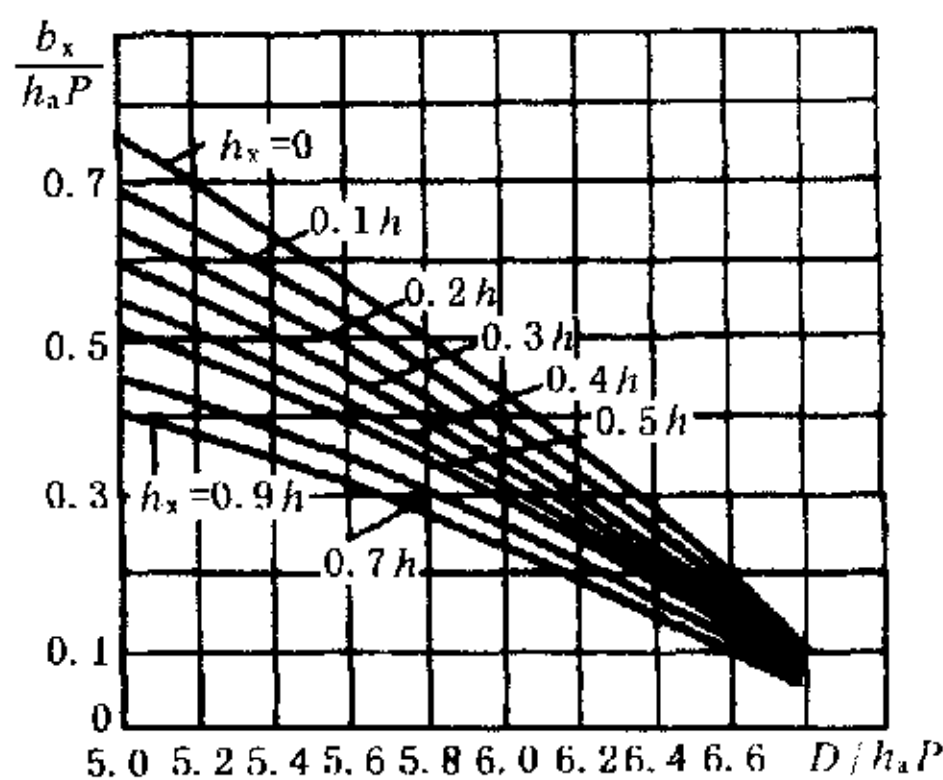
式中:  $h_0$ ——两针间保护范围上部边缘最低点高度, m;

$D$ ——两避雷针间的距离, m。

两针间  $h_x$  水平面上保护范围的一侧最小宽度应按图 4 确定。当  $b_x > r_x$  时, 取  $b_x = r_x$ 。



(a)  $D/h_a P = 0 \sim 7$



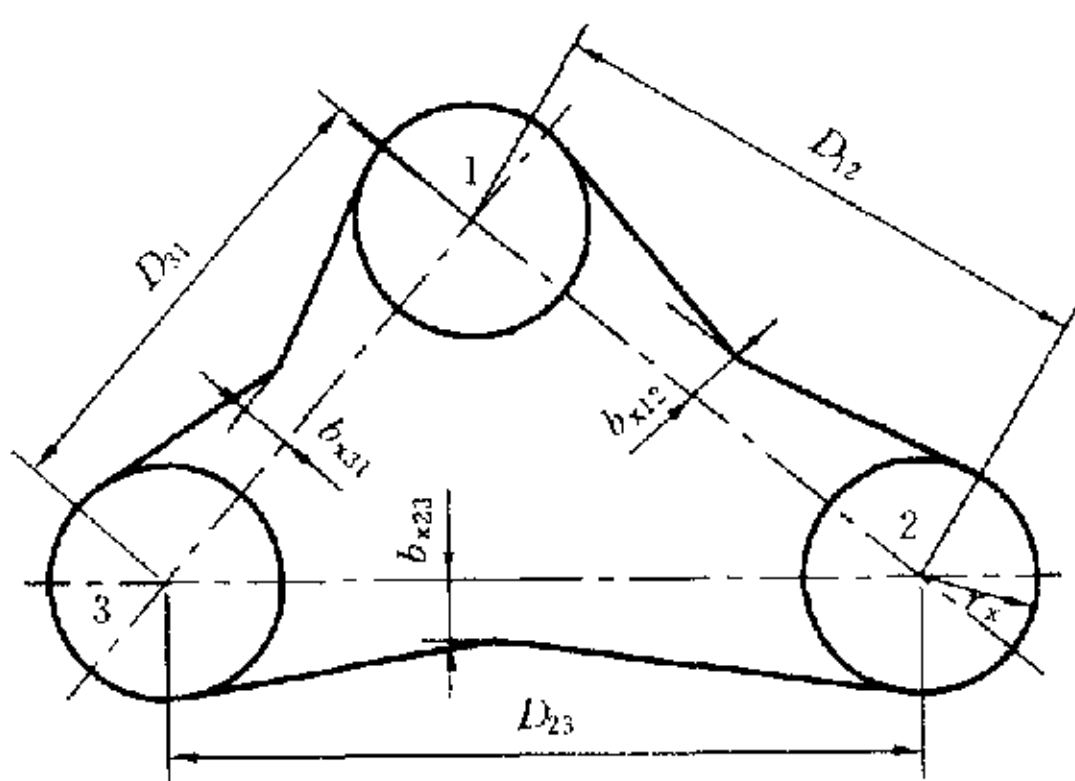
(b)  $D/h_a P = 5 \sim 7$

图 4 两等高( $h$ )避雷针间保护范围的一侧最小宽度( $b_x$ )与  $D/h_a P$  的关系

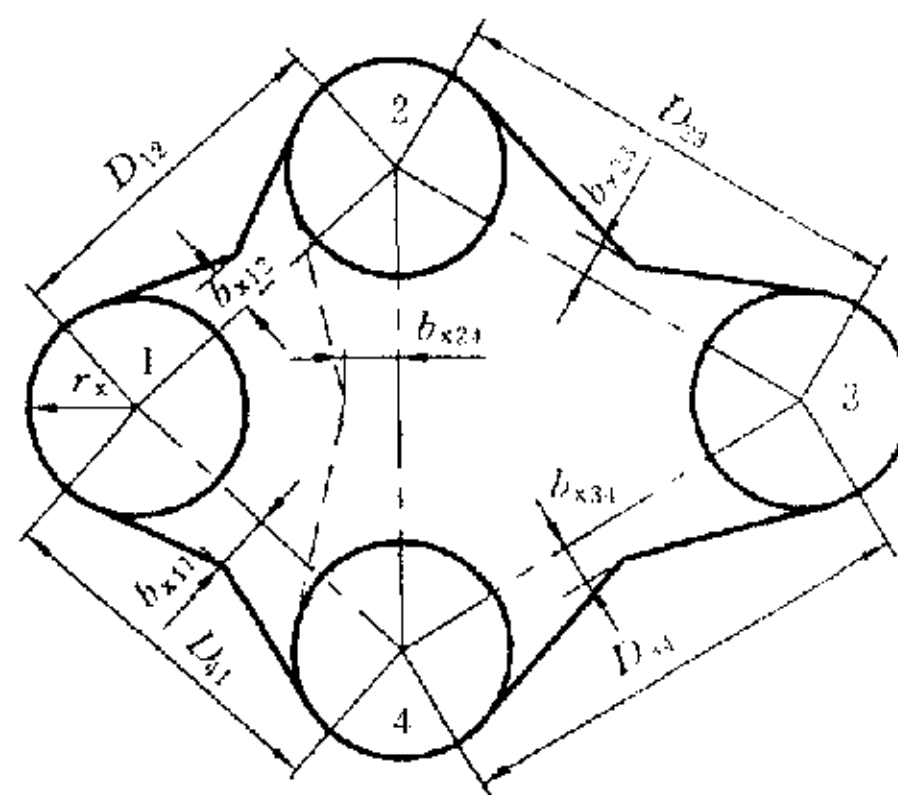
求得  $b_x$  后, 可按图 3 绘出两针间的保护范围。

两针间距离与针高之比  $D/h$  不宜大于 5。

### 5.2.3 多支等高避雷针的保护范围[图 5(a)及图 5(b)]。



(a) 三支等高避雷针在  $h_x$  水平面上的保护范围



(b) 四支等高避雷针在  $h_x$  水平面上的保护范围

图 5 三、四支等高避雷针在  $h_x$  水平面上的保护范围

a) 三支等高避雷针所形成的三角形的外侧保护范围应分别按两支等高避雷针的计算方法确定。如在三角形内被保护物最大高度  $h_x$  水平面上, 各相邻避雷针间保护范围的一侧最小宽度  $b_x \geq 0$  时, 则全部面积受到保护。

b) 四支及以上等高避雷针所形成的四角形或多角形, 可先将其分成两个或数个三角形, 然后分别按三支等高避雷针的方法计算。如各边的保护范围一侧最小宽度  $b_x \geq 0$ , 则全部面积即受到保护。

### 5.2.4 单根避雷线在 $h_x$ 水平面上每侧保护范围的宽度(图 6)。

a) 当  $h_x \geq \frac{h}{2}$  时,

$$r_x = 0.47(h - h_x)P \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:  $r_x$ ——每侧保护范围的宽度, m。

b) 当  $h_x < \frac{h}{2}$  时,

$$r_x = (h - 1.53h_x)P \quad \dots\dots\dots(9)$$

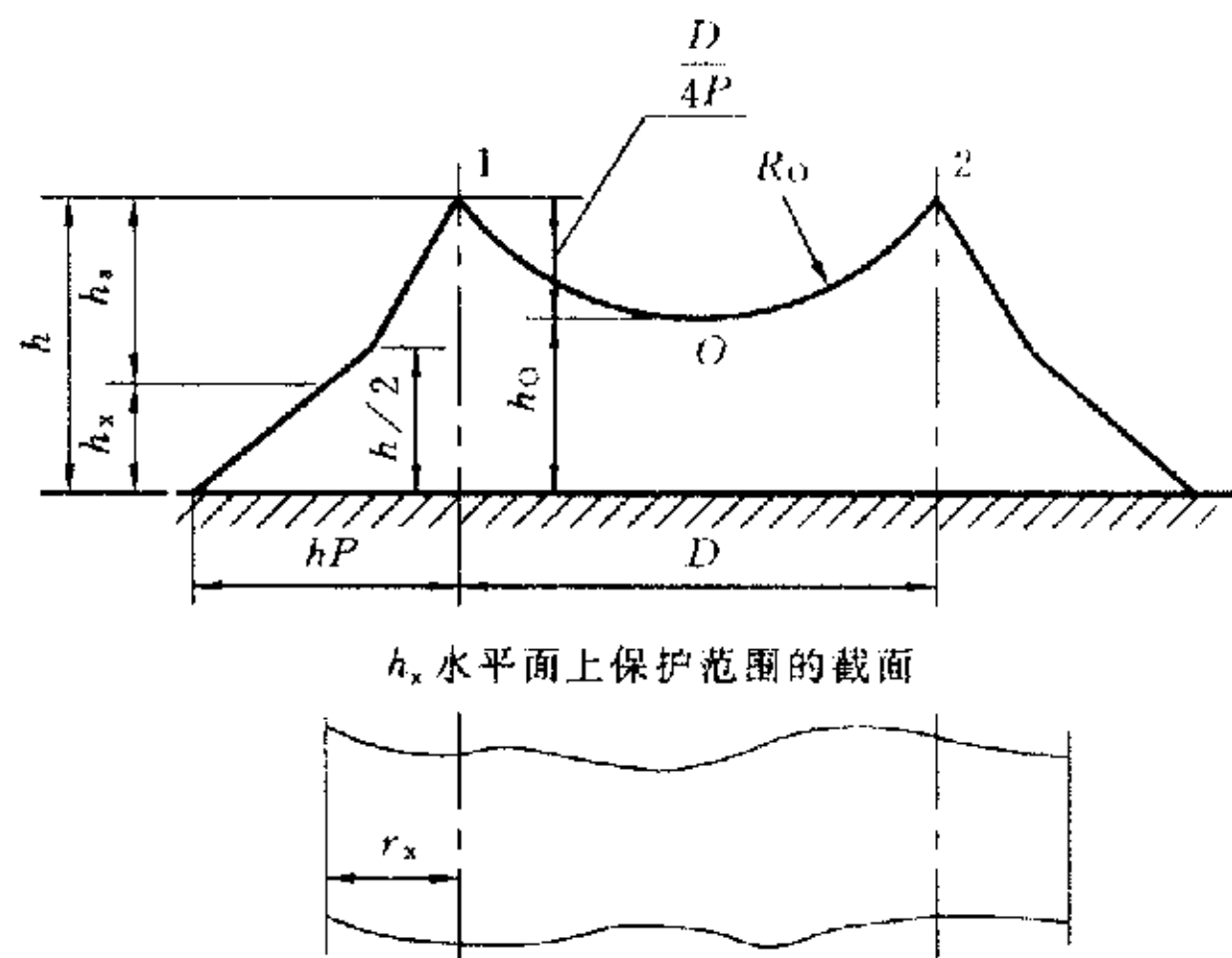
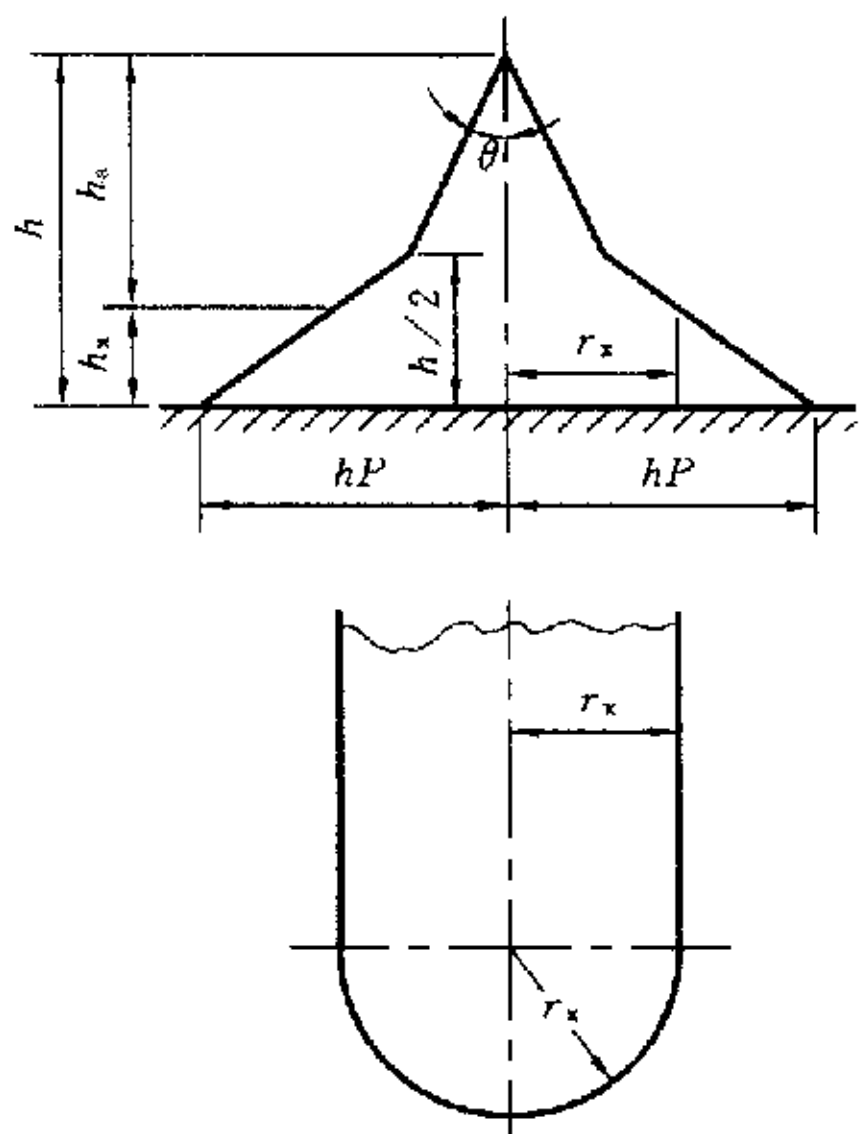


图 6 单根避雷线的保护范围( $h \leq 30$  m 时,  $\theta = 25^\circ$ )

图 7 两根平行避雷线的保护范围

#### 5.2.5 两根等高平行避雷线的保护范围(图 7)。

a) 两避雷线外侧的保护范围应按单根避雷线的计算方法确定。

b) 两避雷线间各横截面的保护范围应由通过两避雷线 1、2 点及保护范围边缘最低点 O 的圆弧确定。O 点的高度应按式(10)计算:

$$h_0 = h - \frac{D}{4P} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:  $h_0$ ——两避雷线间保护范围上部边缘最低点的高度, m;

$D$ ——两避雷线间的距离, m;

$h$ ——避雷线的高度, m。

c) 两避雷线端部的两侧保护范围仍按单根避雷线保护范围计算。两线间保护最小宽度(参见图 3)按下列方法确定:

1) 当  $h_x \geq \frac{h}{2}$  时,

$$b_x = 0.47(h_0 - h_x)P \quad \dots\dots\dots(11)$$

2) 当  $h_x < \frac{h}{2}$  时,

$$b_x = (h_0 - 1.53h_x)P \quad \dots\dots\dots(12)$$

#### 5.2.6 不等高避雷针、避雷线的保护范围(图 8)。

a) 两支不等高避雷针外侧的保护范围应分别按单支避雷针的计算方法确定。

b) 两支不等高避雷针间的保护范围应按单支避雷针的计算方法, 先确定较高避雷针 1 的保护范围, 然后由较低避雷针 2 的顶点, 作水平线与避雷针 1 的保护范围相交于点 3, 取点 3 为等效避雷针的顶点, 再按两支等高避雷针的计算方法确定避雷针 2 和 3 间的保护范围。通过避雷针 2、3 顶点及保护范围上部边缘最低点的圆弧, 其弓高应按式(13)计算:

$$f = \frac{D'}{7P} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:  $f$ ——圆弧的弓高, m;

$D'$ ——避雷针 2 和等效避雷针 3 间的距离, m。

c) 对多支不等高避雷针所形成的多角形, 各相邻两避雷针的外侧保护范围按两支不等高避雷针的计算方法确定; 三支不等高避雷针, 如在三角形内被保护物最大高度  $h_x$  水平面上, 各相邻避雷针间保护范围一侧最小宽度  $b_x \geq 0$ , 则全部面积即受到保护; 四支及以上不等高避雷针所形成的多角形, 其内侧保护范围可仿照等高避雷针的方法确定。

d) 两根不等高避雷线各横截面的保护范围, 应仿照两支不等高避雷针的方法, 按式(10)计算。

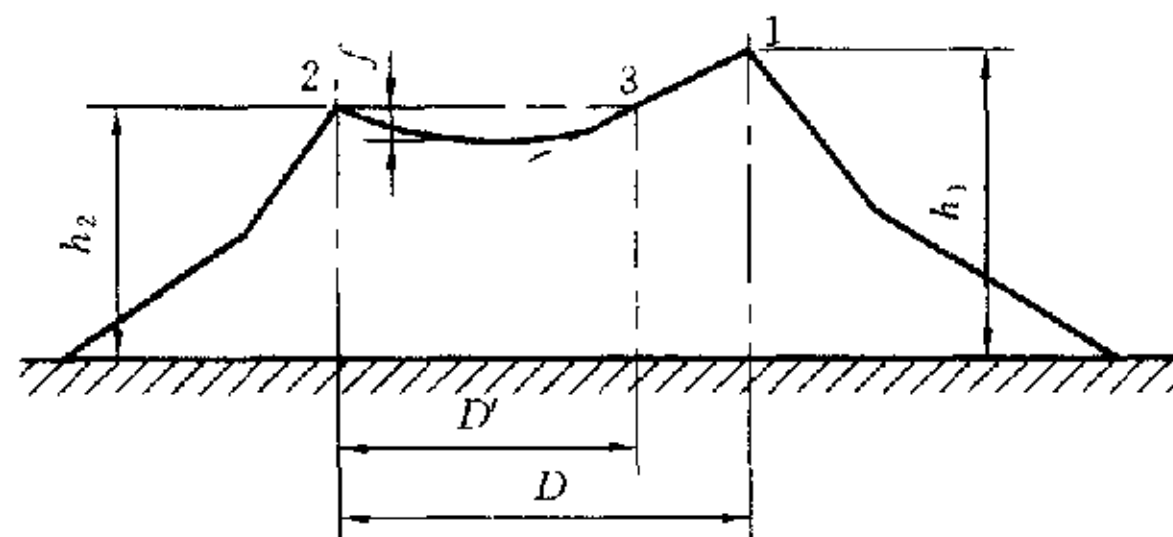


图 8 两支不等高避雷针的保护范围

5.2.7 山地和坡地上的避雷针, 由于地形、地质、气象及雷电活动的复杂性, 避雷针的保护范围应有所减小。避雷针的保护范围可按式(4)~式(6)的计算结果和依图 4 确定的  $b_x$  等乘以系数 0.75 求得; 式

(7)可修改为  $h_0 = h - \frac{D}{5P}$ ; 式(13)可修改为  $f = \frac{D'}{5P}$ 。

利用山势设立的远离被保护物的避雷针不得作为主要保护装置。

5.2.8 相互靠近的避雷针和避雷线的联合保护范围可近似按下列方法确定(图 9):

避雷针、线外侧保护范围分别按单针、线的保护范围确定。内侧首先将不等高针、线划为等高针、线, 然后将等高针、线视为等高避雷线计算其保护范围。

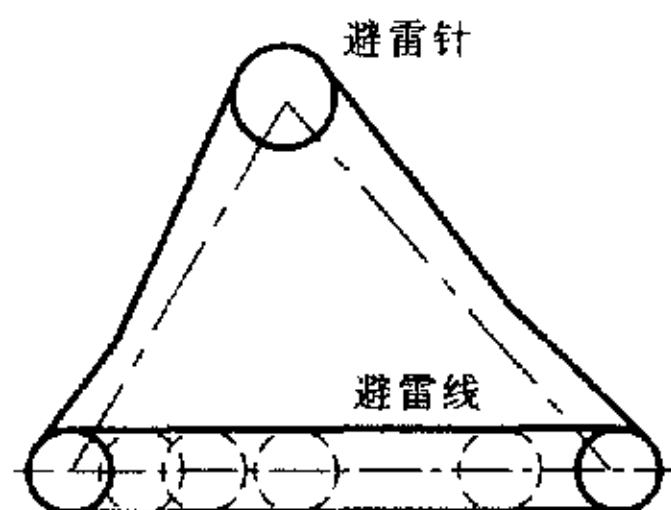


图 9 避雷针和避雷线的联合保护范围

### 5.3 阀式避雷器

5.3.1 采用阀式避雷器进行雷电过电压保护时, 除旋转电机外, 对不同电压范围、不同系统接地方式的避雷器选型如下:

a) 有效接地系统, 范围 II 应该选用金属氧化物避雷器; 范围 I 宜采用金属氧化物避雷器。

b) 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)和低电阻接地系统应该选用金属氧化物避雷器。

c) 不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统, 根据系统中谐振过电压和间歇性电弧接地过电压等发生的可能性及其严重程度, 可任选金属氧化物避雷器或碳化硅普通阀式避雷器。

5.3.2 旋转电机的雷电侵入波过电压保护, 宜采用旋转电机金属氧化物避雷器或旋转电机磁吹阀式避雷器。

5.3.3 有串联间隙金属氧化物避雷器和碳化硅阀式避雷器的额定电压, 在一般情况下应符合下列要求:

a) 110 kV 及 220 kV 有效接地系统不低于  $0.8U_m$ 。

b) 3 kV~10 kV 和 35 kV、66 kV 系统分别不低于  $1.1U_m$  和  $U_m$ ; 3 kV 及以上具有发电机的系统不低于  $1.1U_{m,g}$ 。

注:  $U_{m,g}$  为发电机最高运行电压。



c) 中性点避雷器的额定电压,对 3 kV~20 kV 和 35 kV、66 kV 系统,分别不低于  $0.64U_m$  和  $0.58U_m$ ;对 3 kV~20 kV 发电机,不低于  $0.64U_{m.g}$ 。

5.3.4 采用无间隙金属氧化物避雷器作为雷电过电压保护装置时,应符合下列要求:

- a) 避雷器的持续运行电压和额定电压应不低于表 3 所列数值。
- b) 避雷器能承受所在系统作用的暂时过电压和操作过电压能量。

5.3.5 阀式避雷器标称放电电流下的残压,不应大于被保护电气设备(旋转电机除外)标准雷电冲击全波耐受电压的 71%。

表 3 无间隙金属氧化物避雷器持续运行电压和额定电压

系统接地方式		持续运行电压,kV		额定电压,kV	
		相 地	中性点	相 地	中性点
有效 接地	110 kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.45U_m$	$0.75U_m$	$0.57U_m$
	220 kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.13U_m(0.45U_m)$	$0.75U_m$	$0.17U_m(0.57U_m)$
	330 kV、500 kV	$\frac{U_m}{\sqrt{3}}(0.59U_m)$	$0.13U_m$	$0.75U_m(0.8U_m)$	$0.17U_m$
不 接地	3 kV~20 kV	$1.1U_m;U_{m.g}$	$0.64U_m;U_{m.g}/\sqrt{3}$	$1.38U_m;1.25U_{m.g}$	$0.8U_m;0.72U_{m.g}$
	35 kV、66 kV	$U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$
消弧线圈		$U_m;U_{m.g}$	$U_m/\sqrt{3};U_{m.g}/\sqrt{3}$	$1.25U_m;1.25U_{m.g}$	$0.72U_m;0.72U_{m.g}$
低电阻		$0.8U_m$	—	$U_m$	—
高电阻		$1.1U_m;U_{m.g}$	$1.1U_m/\sqrt{3};U_{m.g}/\sqrt{3}$	$1.38U_m;1.25U_{m.g}$	$0.8U_m;0.72U_{m.g}$
注					
1 220 kV 括号外、内数据分别对应变压器中性点经接地电抗器接地和不接地。					
2 330 kV、500 kV 括号外、内数据分别与工频过电压 1.3p.u. 和 1.4p.u. 对应。					
3 220 kV 变压器中性点经接地电抗器接地和 330 kV、500 kV 变压器或高压并联电抗器中性点经接地电抗器接地时,接地电抗器的电抗与变压器或高压并联电抗器的零序电抗之比小于等于 1/3。					
4 110 kV、220 kV 变压器中性点不接地且绝缘水平低于表 21 所列数值时,避雷器的参数需另行研究确定。					

5.3.6 发电厂和变电所内 35 kV 及以上避雷器应装设简单可靠的多次动作记录器或磁钢记录器。

5.4 排气式避雷器

5.4.1 在选择排气式避雷器时,开断续流的上限,考虑非周期分量,不得小于安装处短路电流的最大有效值;开断续流的下限,不考虑非周期分量,不得大于安装处短路电流的可能最小值。

5.4.2 如按开断续流的范围选择排气式避雷器,最大短路电流应按雷季电力系统最大运行方式计算,并包括非周期分量的第一个半周短路电流有效值。如计算困难,对发电厂附近,可将周期分量第一个半周的有效值乘以 1.5;距发电厂较远的地点,乘以 1.3。最小短路电流应按雷季电力系统最小运行方式计算,且不包括非周期分量。

5.4.3 排气式避雷器外间隙的距离,在符合保护要求的条件下,应采用较大的数值。排气式避雷器外间隙的距离一般采用表 4 所列数值。

表 4 排气式避雷器外间隙的距离

系统标称电压,kV	3	6	10	20	35
最小距离,mm	8	10	15	60	100
最大距离,mm	—	—	—	150~200	250~300

为减少排气式避雷器在反击时动作,应降低与避雷线的总接地电阻,并增大外间隙距离,一般可增大到表 4 所列的外间隙最大距离。

5.4.4 排气式避雷器的设置应符合下列要求:

- a) 应避免各避雷器排出的电离气体相交而造成短路。但在开口端固定避雷器,则允许其排出的电离气体相交。
- b) 为防止在排气式避雷器的内腔积水,宜垂直安装,开口端向下或倾斜安装,与水平线的夹角不应小于 15°。在污秽地区,应增大倾斜角度。
- c) 排气式避雷器应安装牢固,并保证外间隙稳定不变。
- d) 标称电压 10 kV 及以下系统中用的排气式避雷器,为防止雨水造成短路,外间隙的电极不应垂直布置。
- e) 外间隙电极宜镀锌,或采取避免锈水沾污绝缘子的措施。

5.4.5 排气式避雷器应装设简单可靠的动作指示器。

5.5 保护间隙

5.5.1 如排气式避雷器的灭弧能力不能符合要求,可采用保护间隙,并应尽量与自动重合闸装置配合,以减少线路停电事故。保护间隙的主间隙距离不应小于表 5 所列数值。

表 5 保护间隙的主间隙距离最小值

系统标称电压,kV	3	6	10	20	35
间隙距离,mm	8	15	25	100	210

5.5.2 除有效接地系统和低电阻接地系统外,应使单相间隙动作时有利于灭弧,并宜采用角形保护间隙。

保护间隙宜在其接地引下线中串接一个辅助间隙,以防止外物使间隙短路。辅助间隙的距离可采用表 6 所列数值。

表 6 辅助间隙的距离

系统标称电压,kV	3	6、10	20	35
辅助间隙距离,mm	5	10	15	20

6 高压架空线路的雷电过电压保护

6.1 一般线路的保护

6.1.1 送电线路的雷电过电压保护方式,应根据线路的电压等级、负荷性质、系统运行方式、当地原有线路的运行经验、雷电活动的强弱、地形地貌的特点和土壤电阻率的高低等条件,通过技术经济比较确定。

各级电压的送、配电线路,应尽量装设自动重合闸装置。35 kV 及以下的厂区内的短线路,可按需要确定。

6.1.2 各级电压的线路,一般采用下列保护方式:

- a) 330 kV 和 500 kV 线路应沿全线架设双避雷线,但少雷区除外。
- b) 220 kV 线路宜沿全线架设双避雷线;少雷区宜架设单避雷线。
- c) 110 kV 线路一般沿全线架设避雷线,在山区和雷电活动特殊强烈地区,宜架设双避雷线。在少雷区可不沿全线架设避雷线,但应装设自动重合闸装置。
- d) 66 kV 线路,负荷重要且所经地区平均年雷暴日数为 30 以上的地区,宜沿全线架设避雷线。
- e) 35 kV 及以下线路,一般不沿全线架设避雷线。
- f) 除少雷区外,3 kV~10 kV 钢筋混凝土杆配电线路,宜采用瓷或其他绝缘材料的横担;如果用铁横担,对供电可靠性要求高的线路宜采用高一电压等级的绝缘子,并应尽量以较短的时间切除故障,以

减少雷击跳闸和断线事故。

6.1.3 有避雷线的线路,在一般土壤电阻率地区,其耐雷水平不宜低于表 7 所列数值。

表 7 有避雷线线路的耐雷水平

标称电压,kV		35	66	110	220	330	500
耐雷水平 kA	一般线路	20~30	30~60	40~75	75~110	100~150	125~175
	大跨越档中央和发电厂、变电所进线保护段	30	60	75	110	150	175

6.1.4 有避雷线的线路,每基杆塔不连避雷线的工频接地电阻,在雷季干燥时,不宜超过表 8 所列数值。

表 8 有避雷线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率, $\Omega \cdot m$	$\leq 100$	$>100 \sim 500$	$>500 \sim 1\,000$	$>1\,000 \sim 2\,000$	$>2\,000$
接地电阻, $\Omega$	10	15	20	25	30
注:如土壤电阻率超过 $2\,000 \Omega \cdot m$ ,接地电阻很难降低到 $30 \Omega$ 时,可采用 6~8 根总长不超过 500 m 的放射形接地体,或采用连续伸长接地体,接地电阻不受限制。					

雷电活动强烈的地方和经常发生雷击故障的杆塔和线段,应改善接地装置、架设避雷线、适当加强绝缘或架设耦合地线。

6.1.5 杆塔上避雷线对边导线的保护角,一般采用  $20^\circ \sim 30^\circ$ 。220 kV~330 kV 双避雷线线路,一般采用  $20^\circ$  左右,500 kV 一般不大于  $15^\circ$ ,山区宜采用较小的保护角。杆塔上两根避雷线间的距离不应超过导线与避雷线间垂直距离的 5 倍。

6.1.6 有避雷线的线路应防止雷击档距中央反击导线。15℃无风时,档距中央导线与避雷线间的距离宜符合式(14)要求:

$$S_1 = 0.012l + 1 \dots\dots\dots (14)$$

式中:  $S_1$ ——导线与避雷线间的距离,m;  
 $l$ ——档距长度,m。

当档距长度较大,按式(14)计算出的  $S_1$  大于表 10 的数值时,可按后者要求。

6.1.7 中雷区及以上地区 35 kV 及 66 kV 无避雷线线路宜采取措施,减少雷击引起的多相短路和两相异点接地引起的断线事故,钢筋混凝土杆和铁塔宜接地,接地电阻不受限制,但多雷区不宜超过  $30 \Omega$ 。钢筋混凝土杆和铁塔应充分利用其自然接地作用,在土壤电阻率不超过  $100 \Omega \cdot m$  或有运行经验的地区,可不另设人工接地装置。

6.1.8 钢筋混凝土杆铁横担和钢筋混凝土横担线路的避雷线支架、导线横担与绝缘子固定部分或瓷横担固定部分之间,宜有可靠的电气连接并与接地引下线相连。主杆非预应力钢筋如上下已用绑扎或焊接连成电气通路,则可兼作接地引下线。

利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆,其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。

6.1.9 与架空线路相连接的长度超过 50 m 的电缆,应在其两端装设阀式避雷器或保护间隙;长度不超过 50 m 的电缆,只在任一端装设即可。

6.1.10 绝缘避雷线的放电间隙,其间隙值应根据避雷线上感应电压的续流熄弧条件和继电保护的動作条件确定,一般采用 10 mm~40 mm。在海拔 1 000 m 以上的地区,间隙应相应加大。

6.2 线路交叉部分的保护

6.2.1 线路交叉档两端的绝缘不应低于其邻档的绝缘。交叉点应尽量靠近上下方线路的杆塔,以减少导线因初伸长、覆冰、过载温升、短路电流过热而增大弧垂的影响,以及降低雷击交叉档时交叉点上的过电压。

6.2.2 同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时,两交叉线路导线间或上方线路导

线与下方线路避雷线间的垂直距离,当导线温度为 40℃时,不得小于表 9 所列数值。对按允许载流量计算导线截面的线路,还应校验当导线为最高允许温度时的交叉距离,此距离应大于表 15 所列操作过电压间隙距离,且不得小于 0.8 m。

表 9 同级电压线路相互交叉或与较低电压线路通信线路交叉时的交叉距离

系统标称电压,kV	3~10	20~110	220	330	500
交叉距离,m	2	3	4	5	6

6.2.3 3 kV 及以上的同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时,交叉档一般采取下列保护措施:

- a) 交叉档两端的钢筋混凝土杆或铁塔(上、下方线路共 4 基),不论有无避雷线,均应接地。
- b) 3 kV 及以上线路交叉档两端为木杆或木横担钢筋混凝土杆且无避雷线时,应装设排气式避雷器或保护间隙。
- c) 与 3 kV 及以上电力线路交叉的低压线路和通信线路,当交叉档两端为木杆时,应装置保护间隙。

门型木杆上的保护间隙,可由横担与主杆固定处沿杆身敷设接地引下线构成。单木杆针式绝缘子的保护间隙,可在距绝缘子固定点 750 mm 处绑扎接地引下线构成。通信线的保护间隙,可由杆顶沿杆身敷设接地引下线构成。

如交叉距离比表 9 所列数值大 2 m 及以上,则交叉档可不采取保护措施。

6.2.4 如交叉点至最近杆塔的距离不超过 40 m,可不在此线路交叉档的另一杆塔上装设交叉保护用的接地装置、排气式避雷器或保护间隙。

6.3 大跨越档的雷电过电压保护

6.3.1 大跨越档的绝缘水平不应低于同线路的其他杆塔。全高超过 40 m 有避雷线的杆塔,每增高 10 m,应增加一个绝缘子,避雷线对边导线的保护角对 66 kV 及以下和 110 kV 及以上线路分别不宜大于 20°和 15°。接地电阻不应超过表 8 所列数值的 50%,当土壤电阻率大于 2 000 Ω·m 时,也不宜超过 20 Ω。全高超过 100 m 的杆塔,绝缘子数量应结合运行经验,通过雷电过电压的计算确定。

6.3.2 未沿全线架设避雷线的 35 kV 及以上新建线路中的大跨越段,宜架设避雷线。对新建无避雷线的大跨越档,应装设排气式避雷器或保护间隙,新建线路并应比表 15 要求增加一个绝缘子。

6.3.3 根据雷击档距中央避雷线时防止反击的条件,大跨越档导线与避雷线间的距离不得小于表 10 的要求。

表 10 防止反击要求的大跨越档导线与避雷线间的距离

系统标称电压,kV	35	66	110	220	330	500
距 离,m	3.0	6.0	7.5	11.0	15.0	17.5

7 发电厂和变电所的雷电过电压保护

7.1 发电厂和变电所的直击雷过电压保护

7.1.1 发电厂和变电所的直击雷过电压保护可采用避雷针或避雷线。下列设施应装设直击雷保护装置:

- a) 屋外配电装置,包括组合导线和母线廊道;
- b) 火力发电厂的烟囱、冷却塔和输煤系统的高建筑物;
- c) 油处理室、燃油泵房、露天油罐及其架空管道、装卸油台、易燃材料仓库等建筑物;
- d) 乙炔发生站、制氢站、露天氢气罐、氢气罐储存室、天然气调压站、天然气架空管道及其露天贮罐;
- e) 多雷区的列车电站。



7.1.2 发电厂的主厂房、主控制室和配电装置室一般不装设直击雷保护装置。为保护其他设备而装设的避雷针,不宜装在独立的主控制室和 35 kV 及以下变电所的屋顶上。但采用钢结构或钢筋混凝土结构等有屏蔽作用的建筑物的车间变电所可不受此限制。

雷电活动特殊强烈地区的主厂房、主控制室和配电装置室宜设直击雷保护装置。

主厂房如装设避直击雷保护装置或为保护其他设备而在主厂房上装设避雷针,应采取加强分流、装设集中接地装置、设备的接地点尽量远离避雷针接地引下线的入地点、避雷针接地引下线尽量远离电气设备等防止反击的措施,并宜在靠近避雷针的发电机出口处装设一组旋转电机阀式避雷器。

主控制室、配电装置室和 35 kV 及以下变电所的屋顶上如装设直击雷保护装置时,若为金属屋顶或屋顶上有金属结构,则将金属部分接地;若屋顶为钢筋混凝土结构,则将其焊接成网接地;若结构为非导电的屋顶时,则采用避雷带保护,该避雷带的网格为 8 m~10 m,每隔 10 m~20 m 设引下线接地。

上述接地引下线应与主接地网连接,并在连接处加装集中接地装置。

峡谷地区的发电厂和变电所宜用避雷线保护。

已在相邻高建筑物保护范围内的建筑物或设备,可不装设直击雷保护装置。

屋顶上的设备金属外壳、电缆金属外皮和建筑物金属构件均应接地。

7.1.3 露天布置的 GIS 的外壳不需装设直击雷保护装置,但应接地。

7.1.4 发电厂和变电所有爆炸危险且爆炸后可能波及发电厂和变电所内主设备或严重影响发供电的建构筑物(如制氢站、露天氢气贮罐、氢气罐储存室、易燃油泵房、露天易燃油贮罐、厂区内的架空易燃油管道、装卸油台和天然气管道以及露天天然气贮罐等),应用独立避雷针保护,并应采取防止雷电感应的措施。

避雷针与易燃油贮罐和氢气天然气等罐体及其呼吸阀等之间的空气中距离,避雷针及其接地装置与罐体、罐体的接地装置和地下管道的地中距离应符合 7.1.11 a) 及 7.1.11 b) 的要求。避雷针与呼吸阀的水平距离不应小于 3 m,避雷针尖高出呼吸阀不应小于 3 m。避雷针的保护范围边缘高出呼吸阀顶部不应小于 2 m。避雷针的接地电阻不宜超过 10  $\Omega$ 。在高土壤电阻率地区,如接地电阻难于降到 10  $\Omega$ ,允许采用较高的电阻值,但空气中距离和地中距离必须符合 7.1.11 的要求。避雷针与 5 000 m<sup>2</sup> 以上贮罐呼吸阀的水平距离不应小于 5 m,避雷针尖高出呼吸阀不应小于 5 m。

露天贮罐周围应设闭合环形接地体,接地电阻不应超过 30  $\Omega$ (无独立避雷针保护的露天贮罐不应超过 10  $\Omega$ ),接地点不应小于两处,接地点间距不应大于 30 m。架空管道每隔 20 m~25 m 应接地一次,接地电阻不应超过 30  $\Omega$ 。易燃油贮罐的呼吸阀、易燃油和天然气贮罐的热工测量装置应进行重复接地,即与贮罐的接地体用金属线相连。不能保持良好电气接触的阀门、法兰、弯头等管道连接处应跨接。

7.1.5 7.1.1 中所述设施上的直击雷保护装置包括兼作接闪器的设备金属外壳、电缆金属外皮、建筑物金属构件等,其接地可利用发电厂或变电所的主接地网,但应在直击雷保护装置附近装设集中接地装置。

7.1.6 独立避雷针(线)宜设独立的接地装置。在非高土壤电阻率地区,其接地电阻不宜超过 10  $\Omega$ 。当有困难时,该接地装置可与主接地网连接,但避雷针与主接地网的地下连接点至 35 kV 及以下设备与主接地网的地下连接点之间,沿接地体的长度不得小于 15 m。

独立避雷针不应设在人经常通行的地方,避雷针及其接地装置与道路或出入口等的距离不宜小于 3 m,否则应采取均压措施,或铺设砾石或沥青地面,也可铺设混凝土地面。

7.1.7 110 kV 及以上的配电装置,一般将避雷针装在配电装置的架构或房顶上,但在土壤电阻率大于 1 000  $\Omega \cdot m$  的地区,宜装设独立避雷针。否则,应通过验算,采取降低接地电阻或加强绝缘等措施。

66 kV 的配电装置,允许将避雷针装在配电装置的架构或房顶上,但在土壤电阻率大于 500  $\Omega \cdot m$  的地区,宜装设独立避雷针。

35 kV 及以下高压配电装置架构或房顶不宜装避雷针。

装在架构上的避雷针应与接地网连接,并应在其附近装设集中接地装置。装有避雷针的架构上,接

地部分与带电部分间的空气中距离不得小于绝缘子串的长度;但在空气污秽地区,如有困难,空气中距离可按非污秽区标准绝缘子串的长度确定。

除水力发电厂外,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 15 m。

7.1.8 除水力发电厂外,在变压器门型架构上和离变压器主接地线小于 15 m 的配电装置的架构上,当土壤电阻率大于  $350 \Omega \cdot m$  时,不允许装设避雷针、避雷线;如不大于  $350 \Omega \cdot m$ ,则应根据方案比较确有经济效益,经过计算采取相应的防止反击措施,并至少遵守下列规定,方可在变压器门型架构上装设避雷针、避雷线:

a) 装在变压器门型架构上的避雷针应与接地网连接,并应沿不同方向引出 3 根~4 根放射形水平接地体,在每根水平接地体上离避雷针架构 3 m~5 m 处装设一根垂直接地体;

b) 直接在 3 kV~35 kV 变压器的所有绕组出线上或在离变压器电气距离不大于 5 m 条件下装设阀式避雷器。

高压侧电压 35 kV 变电所,在变压器门型架构上装设避雷针时,变电所接地电阻不应超过  $4 \Omega$  (不包括架构基础的接地电阻)。

7.1.9 110 kV 及以上配电装置,可将线路的避雷线引接到出线门型架构上,土壤电阻率大于  $1000 \Omega \cdot m$  的地区,应装设集中接地装置。

35 kV、66 kV 配电装置,在土壤电阻率不大于  $500 \Omega \cdot m$  的地区,允许将线路的避雷线引接到出线门型架构上,但应装设集中接地装置。在土壤电阻率大于  $500 \Omega \cdot m$  的地区,避雷线应架设到线路终端杆塔为止。从线路终端杆塔到配电装置的一档线路的保护,可采用独立避雷针,也可在线路终端杆塔上装设避雷针。

7.1.10 火力发电厂烟囱附近的引风机及其电动机的机壳应与主接地网连接,并应装设集中接地装置,该接地装置宜与烟囱的接地装置分开。如不能分开,引风机的电源线应采用带金属外皮的电缆,电缆的金属外皮应与接地装置连接。机械通风冷却塔上电动机的电源线、装有避雷针和避雷线的架构上的照明灯电源线,均必须采用直接埋入地下的带金属外皮的电缆或穿入金属管的导线。电缆外皮或金属管埋地长度在 10 m 以上,才允许与 35 kV 及以下配电装置的接地网及低压配电装置相连接。

严禁在装有避雷针、避雷线的构筑物上架设未采取保护措施通信线、广播线和低压线。

7.1.11 独立避雷针、避雷线与配电装置带电部分间的空气中距离以及独立避雷针、避雷线的接地装置与接地网间的地中距离。

a) 独立避雷针与配电装置带电部分、发电厂和变电所电气设备接地部分、架构接地部分之间的空气中距离,应符合式(15)的要求:

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1h \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中:  $S_a$ ——空气中距离, m;

$R_i$ ——避雷针的冲击接地电阻,  $\Omega$ ;

$h$ ——避雷针校验点的高度, m。

b) 独立避雷针的接地装置与发电厂或变电所接地网间的地中距离,应符合式(16)的要求:

$$S_e \geq 0.3R_i \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:  $S_e$ ——地中距离, m。

c) 避雷线与配电装置带电部分、发电厂和变电所电气设备接地部分以及架构接地部分间的空气中距离,应符合下列要求:

对一端绝缘另一端接地的避雷线:

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1(h + \Delta l) \quad \dots\dots\dots(17)$$

式中:  $h$ ——避雷线支柱的高度, m;

$\Delta l$ ——避雷线上校验的雷击点与接地支柱的距离, m。

对两端接地的避雷线：

$$S_a \geq \beta' [0.2R_i + 0.1(h + \Delta l)] \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中： $\beta'$ ——避雷线分流系数；

$\Delta l$ ——避雷线上校验的雷击点与最近支柱间的距离，m。

避雷线分流系数可按式(19)计算：

$$\beta' = \frac{1 + \frac{\tau_i R_i}{12.4(l_2 + h)}}{1 + \frac{\Delta l + h}{l_2 + h} + \frac{\tau_i R_i}{6.2(l_2 + h)}} \approx \frac{l_2 + h}{l_2 + \Delta l + 2h} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中： $l_2$ ——避雷线上校验的雷击点与另一端支柱间的距离， $l_2 = l' - \Delta l$ ，m；

$l'$ ——避雷线两支柱间的距离，m；

$\tau_i$ ——雷电流波头长度，一般取  $2.6 \mu s$ 。

d) 避雷线的接地装置与发电厂或变电所接地网间的地中距离，应符合下列要求：

对一端绝缘另一端接地的避雷线，应按式(16)校验。对两端接地的避雷线应按式(20)校验：

$$S_a \geq 0.3\beta' R_i \quad \dots\dots\dots (20)$$

e) 除上述要求外，对避雷针和避雷线， $S_a$  不宜小于 5 m， $S_e$  不宜小于 3 m。

对 66 kV 及以下配电装置，包括组合导线、母线廊道等，应尽量降低感应过电压，当条件许可时， $S_e$  应尽量增大。

## 7.2 范围Ⅱ发电厂和变电所高压配电装置的雷电侵入波过电压保护

7.2.1 2 km 架空进线保护段范围内的杆塔耐雷水平应该符合表 7 的要求。应采取措施防止或减少近区雷击闪络。

7.2.2 具有架空进线电气设备采用标准绝缘水平的 330 kV 发电厂和变电所敞开式高压配电装置中，金属氧化物避雷器至主变压器的距离，对于单、双、三和四回进线的情况，分别为 90 m、140 m、170 m 和 190 m。对其他电器的最大距离可相应增加 35%。

7.2.3 敞开式发电厂和变电所采用  $1\frac{1}{2}$  断路器主接线时，金属氧化物避雷器宜装设在每回线路的入口和每一主变压器回路上，母线较长时是否需装设避雷器可通过校验确定。

7.2.4 采用 GIS、主接线为  $1\frac{1}{2}$  断路器的发电厂和变电所，金属氧化物避雷器宜安装于每回线路的入口，每组母线上是否安装需经校验确定。当升压变压器经较长的气体绝缘管道或电缆接至 GIS 母线时（如水力发电厂）以及接线复杂的 GIS 发电厂和变电所的避雷器的配置可通过校验确定。

7.2.5 范围Ⅱ的变压器和高压并联电抗器的中性点经接地电抗器接地时，中性点上应装设金属氧化物避雷器保护。

## 7.3 范围Ⅰ发电厂和变电所高压配电装置的雷电侵入波过电压保护

7.3.1 发电厂和变电所应采取措施防止或减少近区雷击闪络。未沿全线架设避雷线的 35 kV~110 kV 架空送电线路，应在变电所 1 km~2 km 的进线段架设避雷线。

220 kV 架空送电线路，在 2 km 进线保护段范围内以及 35 kV~110 kV 线路在 1 km~2 km 进线保护段范围内的杆塔耐雷水平应该符合表 7 的要求。

进线保护段上的避雷线保护角宜不超过  $20^\circ$ ，最大不应超过  $30^\circ$ 。

7.3.2 未沿全线架设避雷线的 35 kV~110 kV 线路，其变电所的进线段应采用图 10 所示的保护接线。



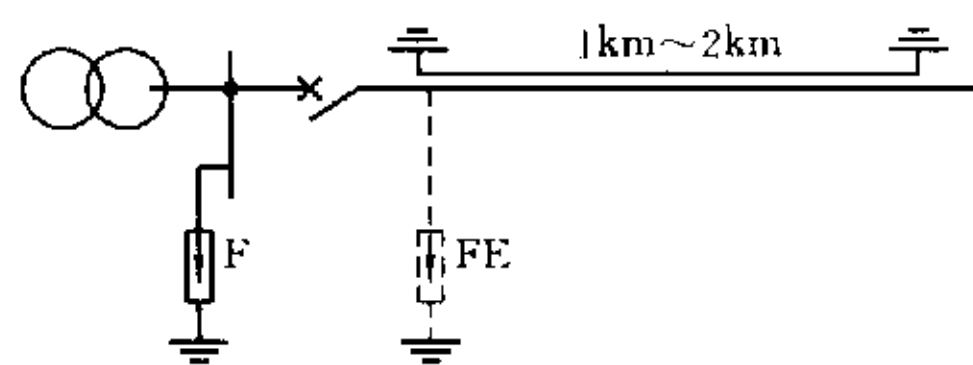
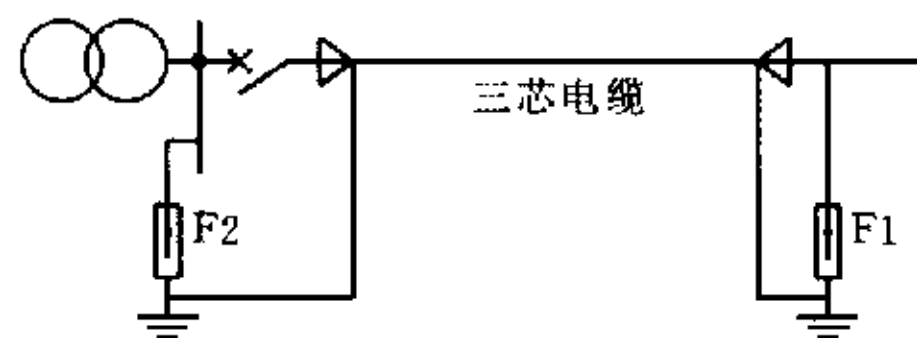


图 10 35 kV~110 kV 变电所的进线保护接线

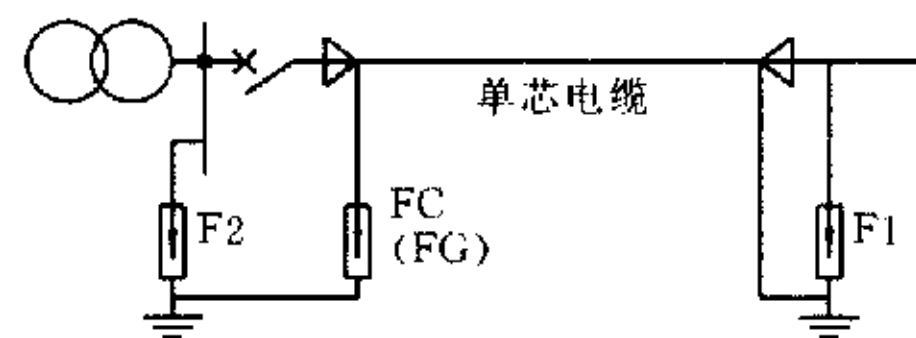
在雷季，如变电所 35 kV~110 kV 进线的隔离开关或断路器可能经常断路运行，同时线路侧又带电，必须在靠近隔离开关或断路器处装设一组排气式避雷器 FE。FE 外间隙距离的整定，应使其在断路运行时，能可靠地保护隔离开关或断路器，而在闭路运行时不动作。如 FE 整定有困难，或无适当参数的排气式避雷器，则可用阀式避雷器代替。

全线架设避雷线的 35 kV~220 kV 变电所，其进线的隔离开关或断路器与上述情况相同时，宜在靠近隔离开关或断路器处装设一组保护间隙或阀式避雷器。

7.3.3 发电厂、变电所的 35 kV 及以上电缆进线段，在电缆与架空线的连接处应装设阀式避雷器，其接地端应与电缆金属外皮连接。对三芯电缆，末端的金属外皮应直接接地[图 11(a)]；对单芯电缆，应经金属氧化物电缆护层保护器(FC)或保护间隙(FG)接地[图 11(b)]。



(a) 三芯电缆段的变电所进线保护接线



(b) 单芯电缆段的变电所进线保护接线

图 11 具有 35 kV 及以上电缆段的变电所进线保护接线

如电缆长度不超过 50 m 或虽超过 50 m，但经校验，装一组阀式避雷器即能符合保护要求，图 11 中可只装 F1 或 F2。

如电缆长度超过 50 m，且断路器在雷季可能经常断路运行，应在电缆末端装设排气式避雷器或阀式避雷器。

连接电缆段的 1 km 架空线路应架设避雷线。

全线电缆—变压器组接线的变电所内是否需装设阀式避雷器，应视电缆另一端有无雷电过电压波侵入的可能，经校验确定。

7.3.4 具有架空进线的 35 kV 及以上发电厂和变电所敞开式高压配电装置中阀式避雷器的配置。

a) 每组母线上应装设阀式避雷器。阀式避雷器与主变压器及其他被保护设备的电气距离超过表 11 或表 12 的参考值时，可在主变压器附近增设一组阀式避雷器。

表 11 普通阀式避雷器至主变压器间的最大电气距离 m

系统标称电压 kV	进线长度 km	进 线 路 数			
		1	2	3	≥4
35	1	25	40	50	55
	1.5	40	55	65	75
	2	50	75	90	105
66	1	45	65	80	90
	1.5	60	85	105	115
	2	80	105	130	145



表 11(完)

系统标称电压 kV	进线长度 km	进 线 路 数			
		1	2	3	≥4
110	1	45	70	80	90
	1.5	70	95	115	130
	2	100	135	160	180
220	2	105	165	195	220
注					
1 全线有避雷线进线长度取 2 km,进线长度在 1 km~2 km 间时的距离按补插法确定,表 12 同此。					
2 35 kV 也适用于有串联间隙金属氧化物避雷器的情况。					

变电所内所有阀式避雷器应以最短的接地线与配电装置的主接地网连接,同时应在其附近装设集中接地装置。

b) 35 kV 及以上装有标准绝缘水平的设备和标准特性阀式避雷器且高压配电装置采用单母线、双母线或分段的电气主接线时,碳化硅普通阀式避雷器与主变压器间的最大电气距离可参照表 11 确定。对其他电器的最大距离可相应增加 35%。

金属氧化物避雷器与主变压器间的最大电气距离可参照表 12 确定。对其他电器的最大距离可相应增加 35%。

表 12 金属氧化物避雷器至主变压器间的最大电气距离 m

系统标称电压 kV	进线长度 km	进 线 路 数			
		1	2	3	≥4
110	1	55	85	105	115
	1.5	90	120	145	165
	2	125	170	205	230
220	2	125	195	235	265
		(90)	(140)	(170)	(190)
注					
1 本表也适用于电站碳化硅磁吹避雷器(FM)的情况。					
2 表 12 括号内距离对应的雷电冲击全波耐受电压为 850 kV。					

- 注
- 1 标准绝缘水平指 35 kV、66 kV、110 kV 及 220 kV 变压器、电压互感器标准雷电冲击全波耐受电压分别为 200 kV、325 kV、480 kV 及 950 kV。
  - 2 110 kV 及 220 kV 金属氧化物避雷器在标称放电电流下的残压分别为 260 kV 及 520 kV。

c) 架空进线采用双回路杆塔,有同时遭到雷击的可能,确定阀式避雷器与变压器最大电气距离时,应按一路考虑,且在雷季中宜避免将其中一路断开。

d) 对电气接线比较特殊的情况,可用计算方法或通过模拟试验确定最大电气距离。

7.3.5 有效接地系统中的中性点不接地的变压器,如中性点采用分级绝缘且未装设保护间隙,应在中性点装设雷电过电压保护装置,且宜选变压器中性点金属氧化物避雷器。如中性点采用全绝缘,但变电所为单进线且为单台变压器运行,也应在中性点装设雷电过电压保护装置。

不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统中的变压器中性点,一般不装设保护装置,但多雷区单进线变电所且变压器中性点引出时,宜装设保护装置;中性点接有消弧线圈的变压器,如有单进线运行可能,也应在中性点装设保护装置。该保护装置可任选金属氧化物避雷器或碳化硅普通阀式避雷器。

7.3.6 自耦变压器必须在其两个自耦合的绕组出线上装设阀式避雷器,该阀式避雷器应装在自耦变压

器和断路器之间,并采用图 12 的保护接线。

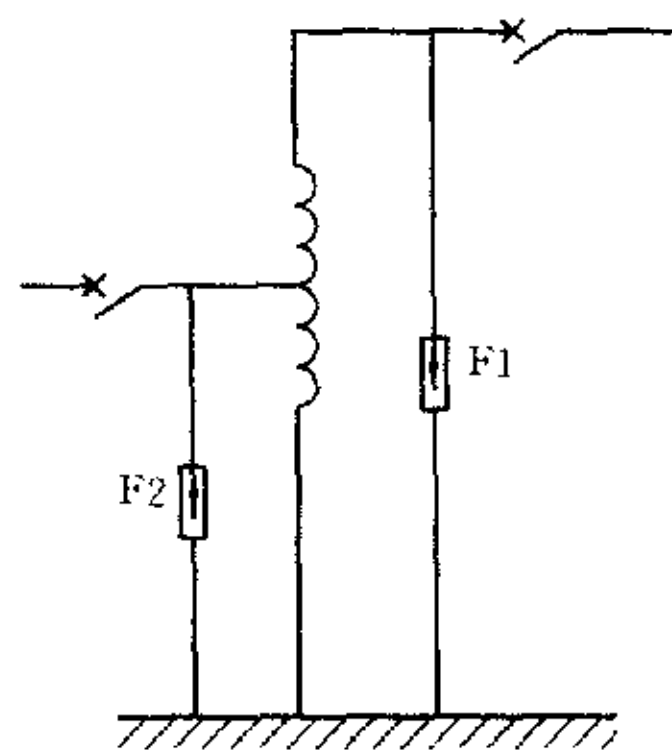


图 12 自耦变压器的典型保护接线

7.3.7 35 kV~220 kV 开关站,应根据其重要性和进线路数等条件,在母线上或进线上装设阀式避雷器。

7.3.8 与架空线路连接的三绕组自耦变压器、变压器(包括一台变压器与两台电机相连的三绕组变压器)的低压绕组如有开路运行的可能和发电厂双绕组变压器当发电机断开由高压侧倒送厂用电时,应在变压器低压绕组三相出线上装设阀式避雷器,以防来自高压绕组的雷电波的感应电压危及低压绕组绝缘;但如该绕组连有 25 m 及以上金属外皮电缆段,则可不装设避雷器。

7.3.9 变电所的 3 kV~10 kV 配电装置(包括电力变压器),应在每组母线和架空进线上装设阀式避雷器(分别采用电站和配电阀式避雷器),并应采用图 13 所示的保护接线。母线上阀式避雷器与主变压器的电气距离不宜大于表 13 所列数值。

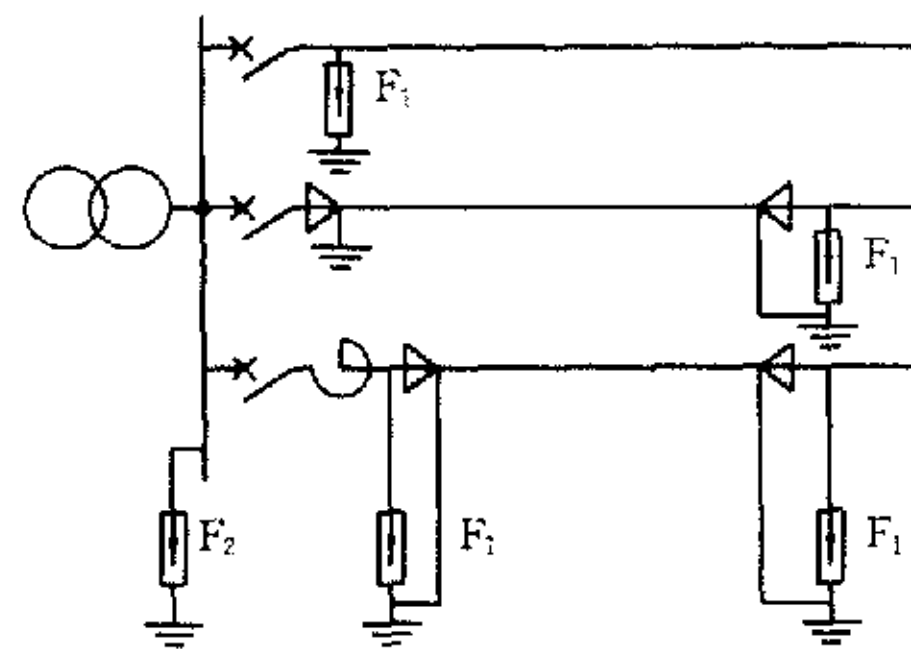


图 13 3 kV~10 kV 配电装置雷电侵入波的保护接线

表 13 阀式避雷器至 3 kV~10 kV 主变压器的最大电气距离

雷季经常运行的进线路数	1	2	3	≥4
最大电气距离,m	15	20	25	30

架空进线全部在厂区内,且受到其他建筑物屏蔽时,可只在母线上装设阀式避雷器。

有电缆段的架空线路,阀式避雷器应装设在电缆头附近,其接地端应和电缆金属外皮相连。如各架空进线均有电缆段,则阀式避雷器与主变压器的最大电气距离不受限制。

阀式避雷器应以最短的接地线与变电所、配电所的主接地网连接(包括通过电缆金属外皮连接)。阀式避雷器附近应装设集中接地装置。

3 kV~10 kV 配电所,当无所用变压器时,可仅在每路架空进线上装设阀式避雷器。

注:配电所指所内仅有起开闭和分配电能作用的配电装置,而母线上无主变压器。

7.4 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)变电所的雷电侵入波过电压保护

7.4.1 66 kV 及以上进线无电缆段的 GIS 变电所,在 GIS 管道与架空线路的连接处,应装设金属氧化物避雷器(FMO1),其接地端应与管道金属外壳连接,如图 14 所示。

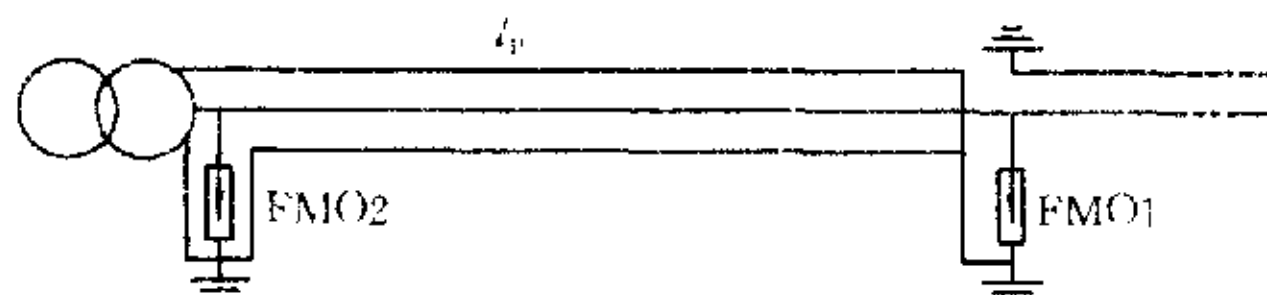


图 14 无电缆段进线的 GIS 变电所保护接线

如变压器或 GIS 一次回路的任何电气部分至 FMO1 间的最大电气距离不超过下列参考值或虽超过,但经校验,装一组避雷器即能符合保护要求,则图 14 中可只装设 FMO1:

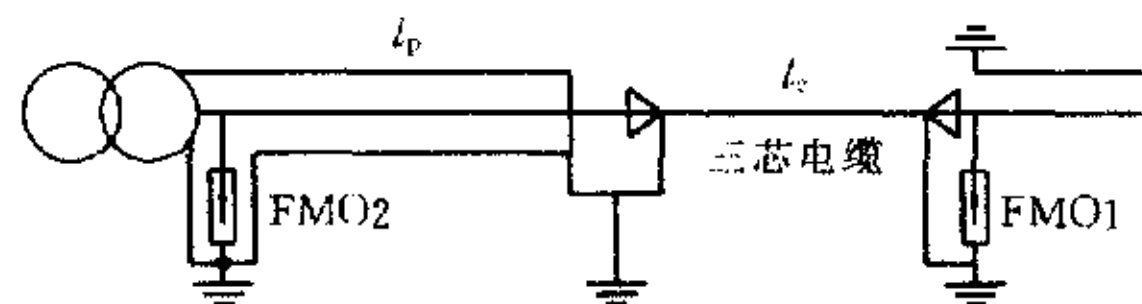
66 kV	50 m
110 kV 及 220 kV	130 m

连接 GIS 管道的架空线路进线保护段的长度应不小于 2 km,且应符合 7.2.1 或 7.2.2 的要求。

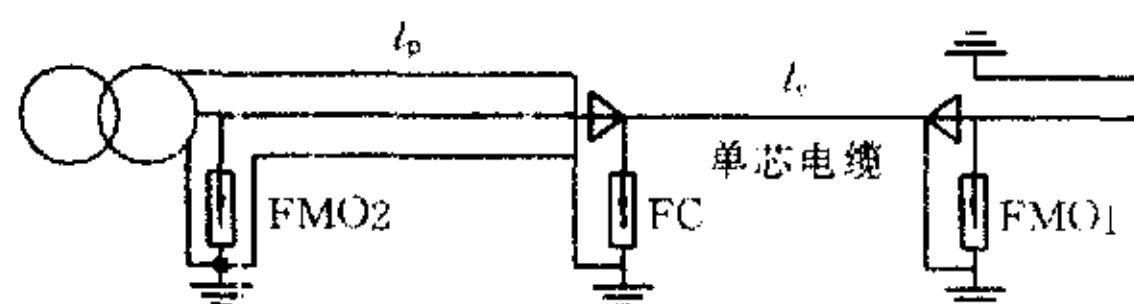
7.4.2 66 kV 及以上进线有电缆段的 GIS 变电所,在电缆段与架空线路的连接处应装设金属氧化物避雷器(FMO1),其接地端应与电缆的金属外皮连接。对三芯电缆,末端的金属外皮应与 GIS 管道金属外壳连接接地[图 15(a)];对单芯电缆,应经金属氧化物电缆护层保护器(FC)接地[图 15(b)]。

电缆末端至变压器或 GIS 一次回路的任何电气部分间的最大电气距离不超过 7.4.1 中的参考值或虽超过,但经校验,装一组避雷器即能符合保护要求,图 15 中可不装设 FMO2。

对连接电缆段的 2 km 架空线路应架设避雷线。



(a) 三芯电缆段进线的 GIS 变电所保护接线



(b) 单芯电缆段进线的 GIS 变电所保护接线

图 15 有电缆段进线的 GIS 变电所保护接线

7.4.3 进线全长为电缆的 GIS 变电所内是否需装设金属氧化物避雷器,应视电缆另一端有无雷电过电压波侵入的可能,经校验确定。

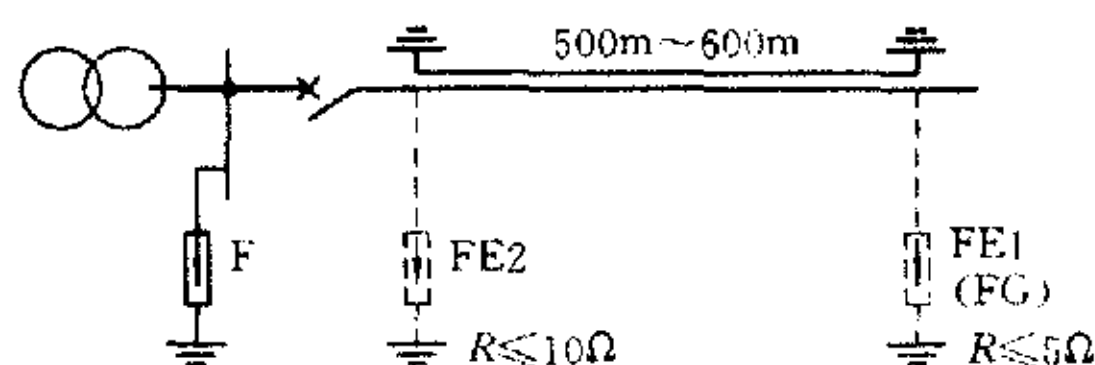
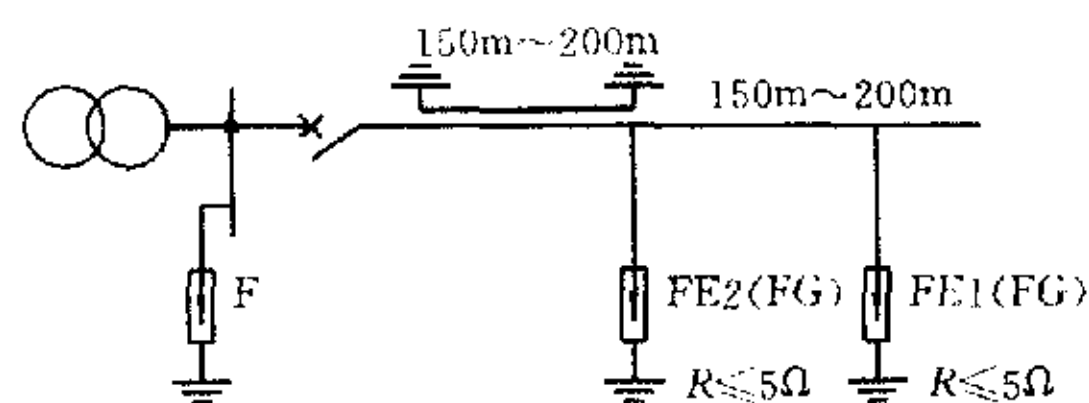


图 16 3 150 kVA~5 000 kVA、35 kV 变电所的简易保护接线

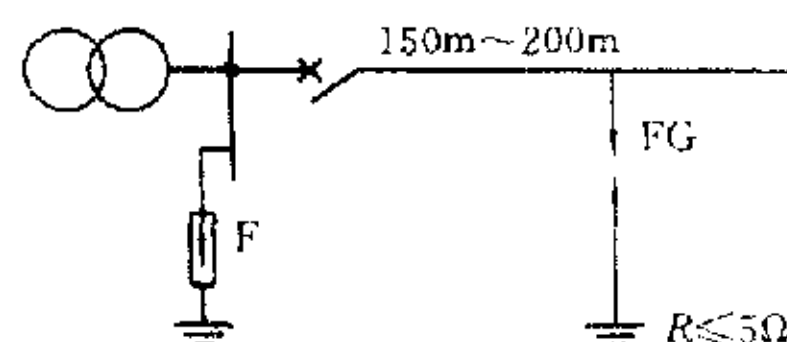
7.5 小容量变电所雷电侵入波过电压的简易保护

7.5.1 3 150 kVA~5 000 kVA 的变电所 35 kV 侧,可根据负荷的重要性及雷电活动的强弱等条件适当简化保护接线,变电所进线段的避雷线长度可减少到 500 m~600 m,但其首端排气式避雷器或保护间隙的接地电阻不应超过 5  $\Omega$ (图 16)。

7.5.2 小于 3 150 kVA 供非重要负荷的变电所 35 kV 侧,根据雷电活动的强弱,可采用图 17(a)的保护接线;容量为 1 000 kVA 及以下的变电所,可采用图 17(b)的保护接线。



(a) 采用避雷线保护的接线



(b) 不采用避雷线保护的接线

图 17 小于 3 150 kVA 变电所的简易保护

7.5.3 小于 3 150 kVA 供非重要负荷的 35 kV 分支变电所,根据雷电活动的强弱,可采用图 18 的保护接线。

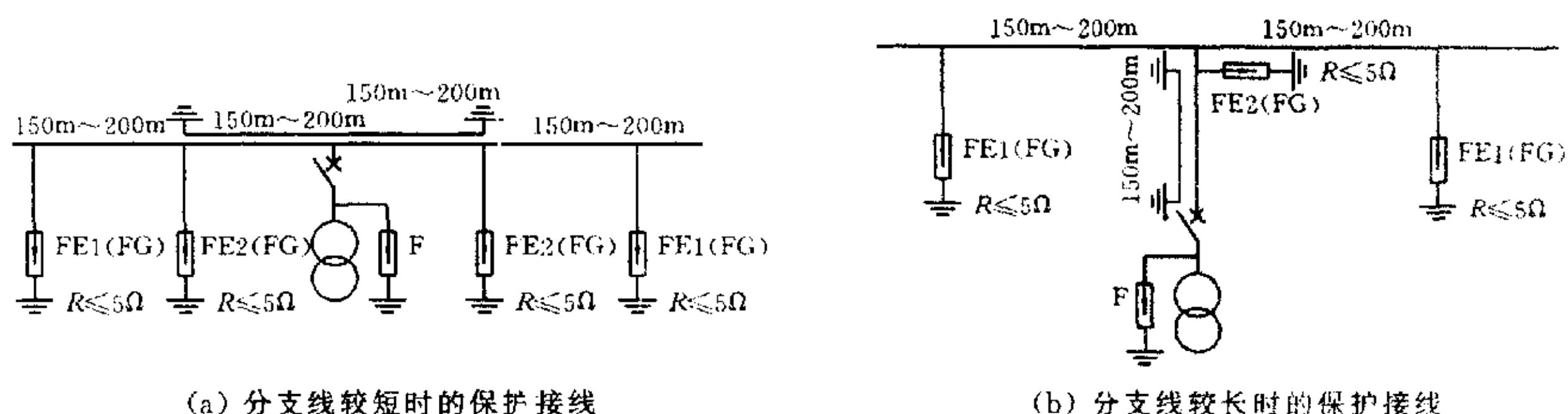


图 18 小于 3 150 kVA 分支变电所的简易保护

7.5.4 简易保护接线的变电所 35 kV 侧,阀式避雷器与主变压器或电压互感器间的最大电气距离不宜超过 10 m。

## 8 配电系统的雷电过电压保护

8.1 3 kV~10 kV 配电系统中的配电变压器应装设阀式避雷器保护。阀式避雷器应尽量靠近变压器装设,其接地线应与变压器低压侧中性点(中性点不接地时则为中性点的击穿保险器的接地端)以及金属外壳等连在一起接地。

8.2 3 kV~10 kV, Y, yn 和 Y, y(低压侧中性点接地和不接地)接线的配电变压器,宜在低压侧装设一组阀式避雷器或击穿保险器,以防止反变换波和低压侧雷电侵入波击穿高压侧绝缘。但厂区内的配电变压器可根据运行经验确定。

低压侧中性点不接地的配电变压器,应在中性点装设击穿保险器。

8.3 35 kV~0.4 kV 配电变压器,其高低压侧均应装设阀式避雷器保护。

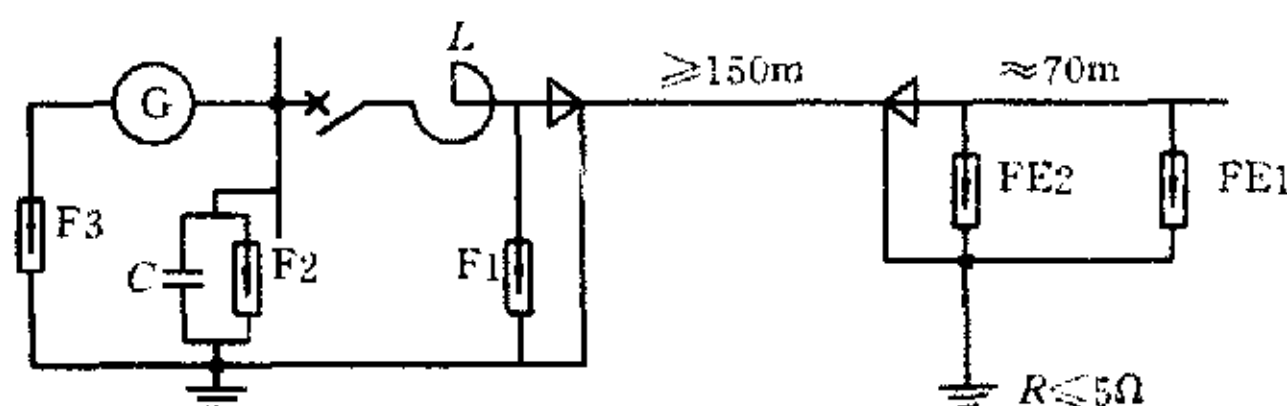
8.4 3 kV~10 kV 柱上断路器和负荷开关应装设阀式避雷器保护。经常断路运行而又带电的柱上断路器、负荷开关或隔离开关,应在带电侧装设阀式避雷器,其接地线应与柱上断路器等金属外壳连接,且接地电阻不应超过 10  $\Omega$ 。

装设在架空线路上的电容器宜装设阀式避雷器保护。

## 9 旋转电机的雷电过电压保护

9.1 与架空线路直接连接的旋转电机(发电机、同步调相机、变频机和电动机,简称直配电机)的保护方式,应根据电机容量、雷电活动的强弱和对运行可靠性的要求确定。

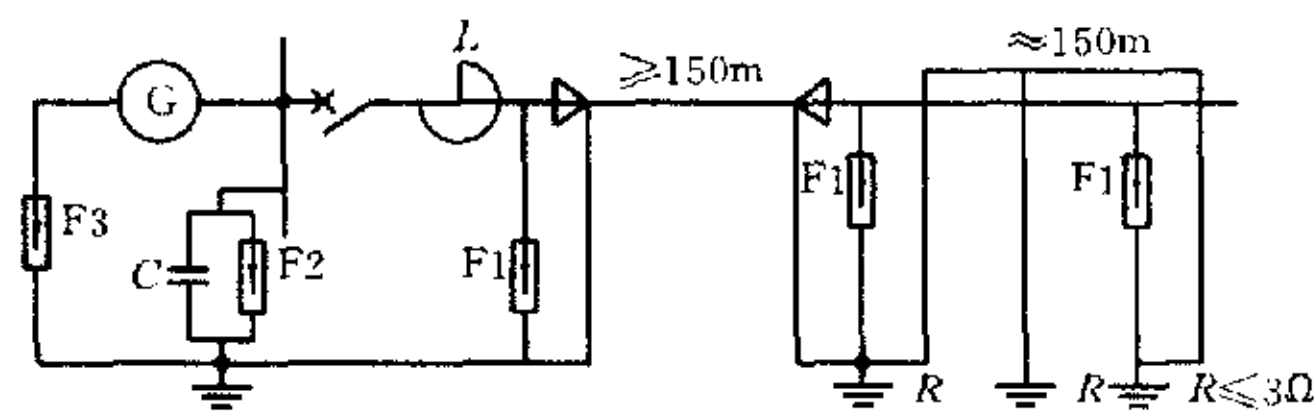
9.2 单机容量为 25 000 kW~60 000 kW 的直配电机,宜采用图 19(a)所示的保护接线。60 000 kW 以上的电机,不应与架空线路直接连接。



(a) 进线段采用耦合地线的保护接线

图 19 25 000 kW~60 000 kW 直配电机的保护接线





(b) 进线段采用避雷线的保护接线

F1—配电阀式避雷器;F2—旋转电机阀式避雷器;F3—旋转电机中性点阀式避雷器;  
FE1、FE2—排气式避雷器;G—发电机;L—限制短路电流用电抗器;C—电容器

图 19(完)

排气式避雷器 FE1 和 FE2 的冲击放电电压不应超过表 14 所列的数值。

FE1 和 FE2 的接地端应用钢绞线连接。钢绞线架设在导线下方,距导线应小于 3 m 但大于 2 m,并应与电缆首端的金属外皮在装设 FE2 杆塔处连在一起接地,工频接地电阻  $R$  不应大于  $5\ \Omega$ 。

表 14 排气式避雷器 FE1 和 FE2 的冲击放电电压

系统标称电压, kV	3	6	10
预放电时间为 $2\ \mu\text{s}$ 的冲击放电电压, kV	40	50	60

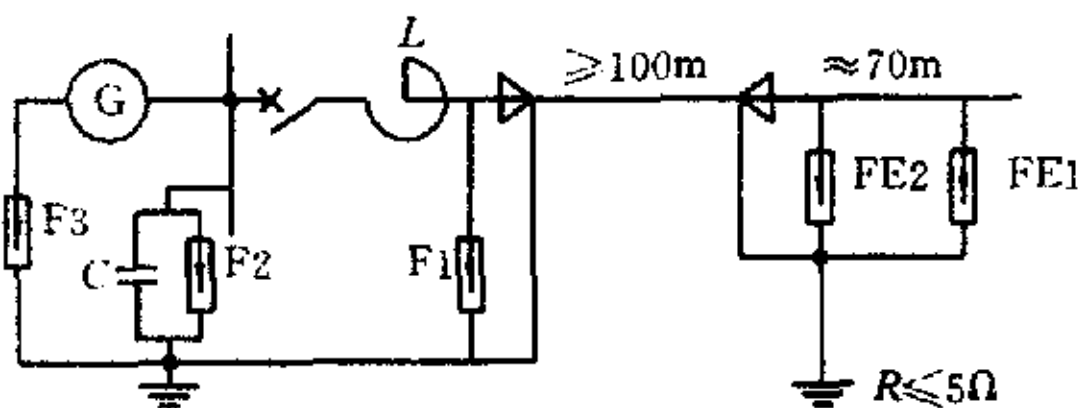
进线电缆段应直接埋设在土壤中,以充分利用其金属外皮的分流作用。如受条件限制不能直接埋设,可将电缆金属外皮多点接地,即除两端接地外,再在两端间的 3 处~5 处接地。

如电缆首端的短路电流较大,按图 19(a)所示的保护接线无适当参数的排气式避雷器可用时,可改用图 19(b)所示的保护接线。

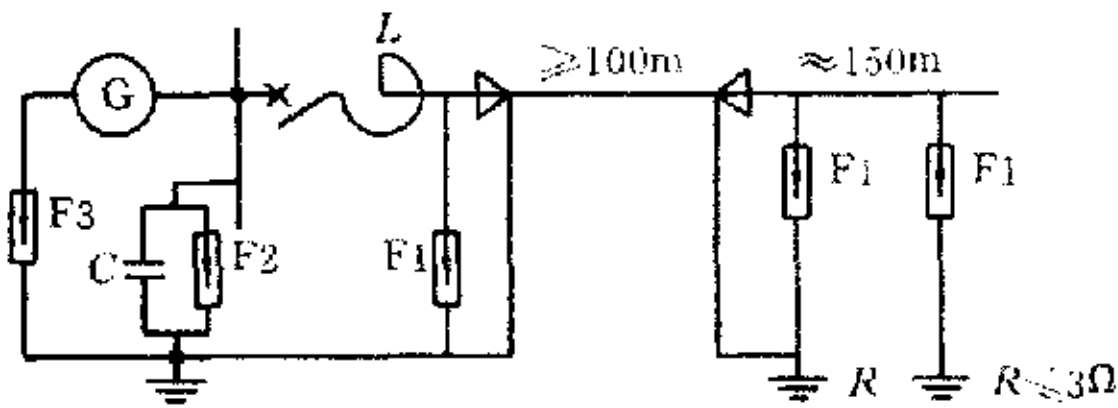
进线段上的阀式避雷器的接地端,应与电缆的金属外皮和避雷线连在一起接地,接地电阻  $R$  不应大于  $3\ \Omega$ 。

9.3 单机容量为  $6\ 000\ \text{kW}$ ~ $25\ 000\ \text{kW}$ (不含  $25\ 000\ \text{kW}$ )的直配电机,宜采用图 20(a)所示的保护接线。在多雷区,也可采用图 19 所示的保护接线。

如电缆首端的短路电流较大,按图 20(a)所示的保护接线无适当参数的排气式避雷器可用时,可改用图 20(b)所示的保护接线。



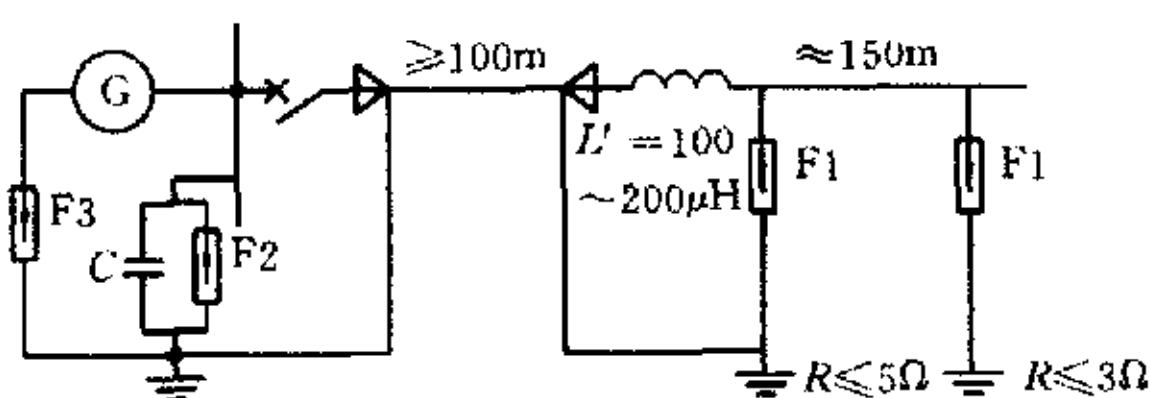
(a) 进线段采用耦合地线的保护接线



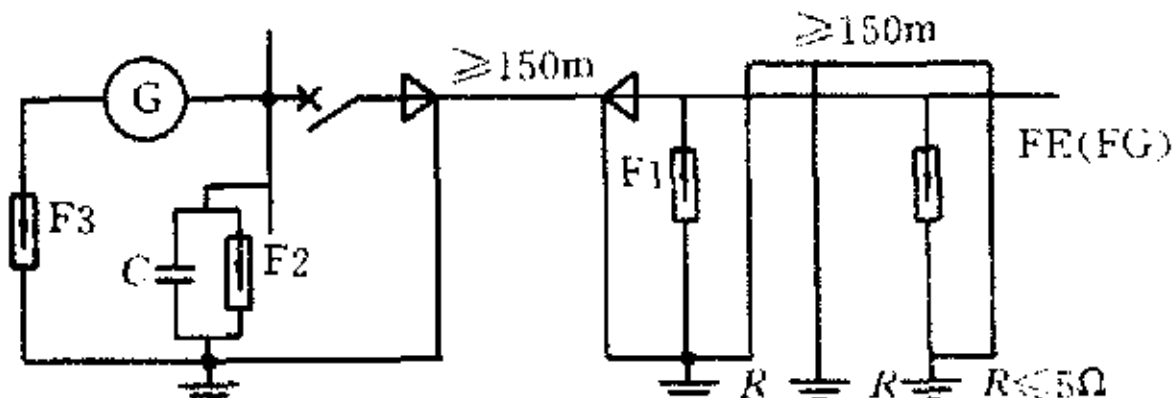
(b) 进线段无耦合地线的保护接线

图 20  $6\ 000\ \text{kW}$ ~ $25\ 000\ \text{kW}$ (不含  $25\ 000\ \text{kW}$ )直配电机的保护接线

9.4 单机容量为  $6\ 000\ \text{kW}$ ~ $12\ 000\ \text{kW}$  的直配电机,如出线回路中无限流电抗器,可采用图 21 所示的保护接线。在雷电活动特殊强烈地区,宜采用有电抗线圈的图 21(a)所示的保护接线。



(a) 进线段采用电感线圈的保护接线



(b) 进线段采用避雷线的保护接线

图 21  $6\ 000\ \text{kW}$ ~ $12\ 000\ \text{kW}$  直配电机的保护接线

9.5 单机容量为 1 500 kW~6 000 kW(不含 6 000 kW)或少雷区 60 000 kW 及以下的直配电机,可采用图 22 所示的保护接线。

在进线保护段长度  $l_0$  内,应装设避雷针或避雷线。

进线保护段长度与排气式避雷器接地电阻的关系应符合下列要求:

对 3 kV 和 6 kV 线路

$$\frac{l_0}{R} \geq 200 \quad \dots\dots\dots(21)$$

对 10 kV 线路

$$\frac{l_0}{R} \geq 150 \quad \dots\dots\dots(22)$$

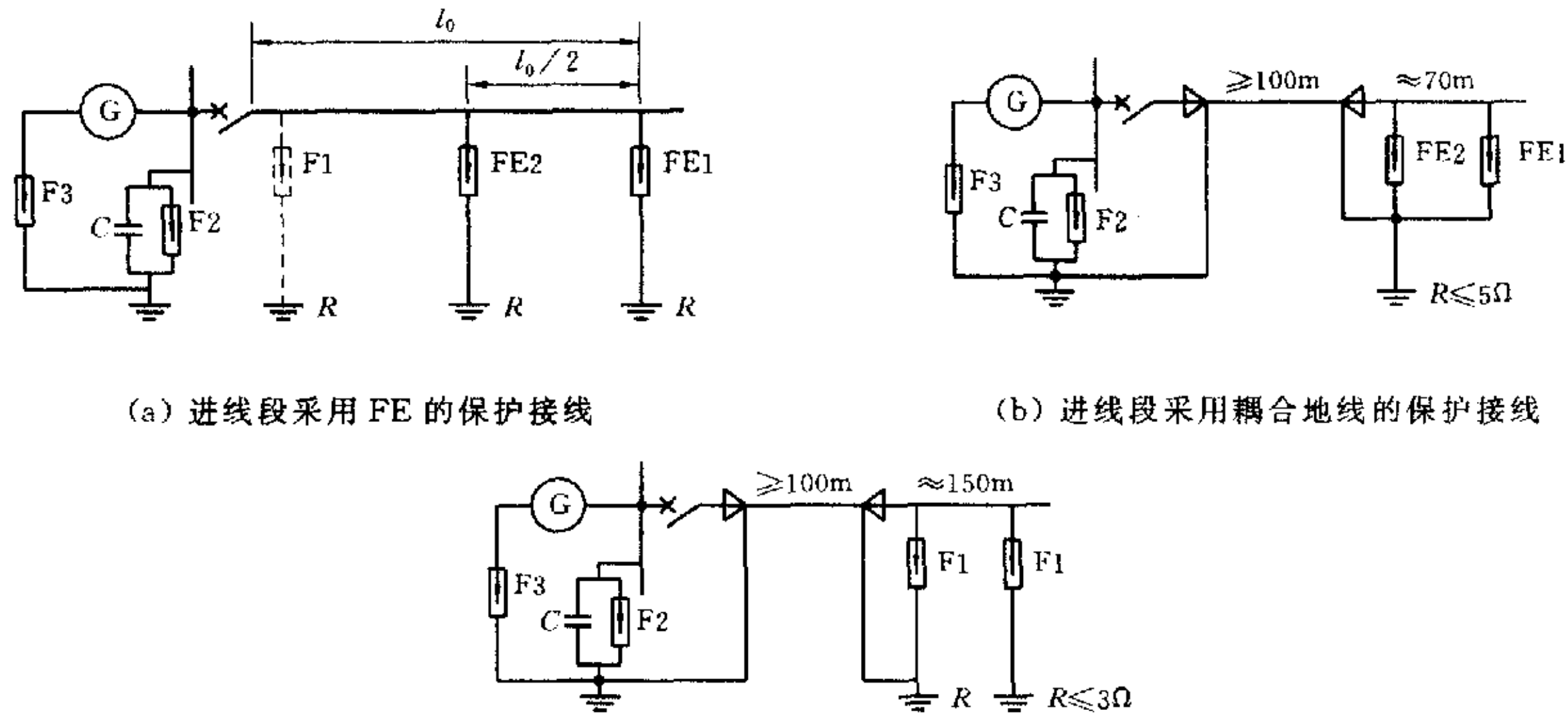
式中:  $l_0$ ——进线保护段长度, m;

$R$ ——接地电阻,  $\Omega$ 。

进线保护段长度一般采用 450 m~600 m。

在进线保护段上如有排气式避雷器 FE2,接地电阻  $R$  可取两组排气式避雷器 FE1 和 FE2 接地电阻的并联值。

图 22(a)中的阀式避雷器 F1 主要用来保护断路器或隔离开关。



(a) 进线段采用 FE 的保护接线

(b) 进线段采用耦合地线的保护接线

(c) 进线段采用 F 的保护接线

图 22 1 500 kW~6 000 kW(不含 6 000 kW)直配电机和少雷地区 60 000 kW 及以下直配电机的保护接线

9.6 单机容量为 1 500 kW~6 000 kW 或列车电站的直配电机,可采用图 23 有电抗线圈或限流电抗器的保护接线。

单机容量为 1 500 kW 以下的直配电机,采用 9.7、9.8 规定的保护方式有困难时,也可采用图 23 所示的保护接线。

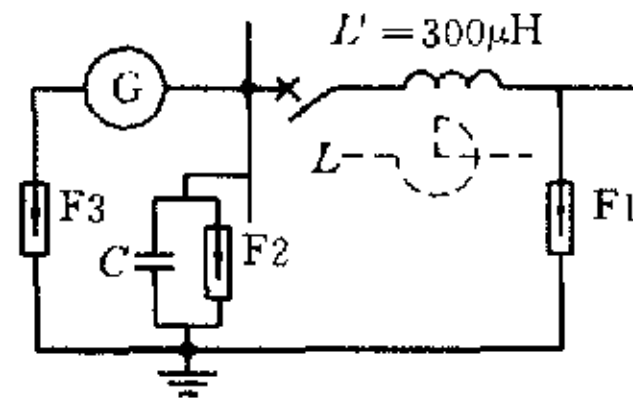


图 23 1 500 kW~6 000 kW 直配电机或列车电站直配电机的保护接线

9.7 单机容量为 1 500 kW 及以下的直配电机,宜采用图 24 所示的保护接线。

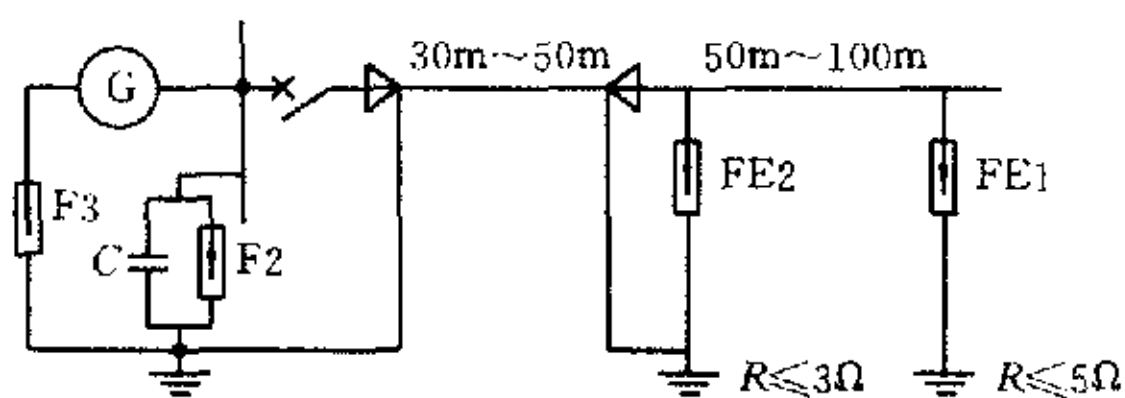
9.8 容量为 25 000 kW 及以上的直配电机,应在每台电机出线处装设一组旋转电机阀式避雷器。25 000 kW 以下的直配电机,避雷器也应尽量靠近电机装设,在一般情况下,避雷器可装在电机出线处;如接在每一组母线上的电机不超过两台,避雷器也可装在每一组母线上。

9.9 如直配电机的中性点能引出且未直接接地,应在中性点上装设旋转电机中性点阀式避雷器。

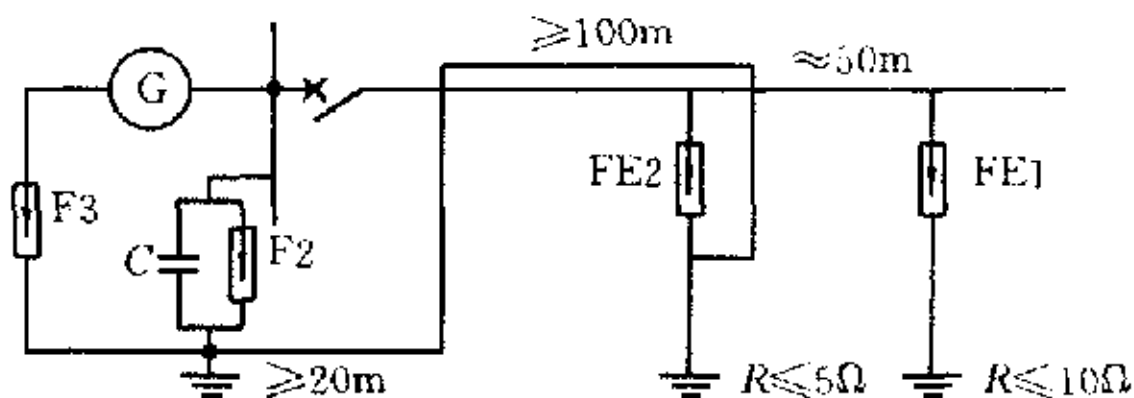
9.10 保护直配电机用的避雷线,对边导线的保护角不应大于  $30^\circ$ 。

9.11 为保护直配电机匝间绝缘和防止感应过电压,装在每相母线上的电容器,包括电缆段电容在内应为  $0.25 \mu\text{F} \sim 0.5 \mu\text{F}$ ;对于中性点不能引出或双排非并绕绕组的电机,应为  $1.5 \mu\text{F} \sim 2 \mu\text{F}$  (图 19~图 24)。

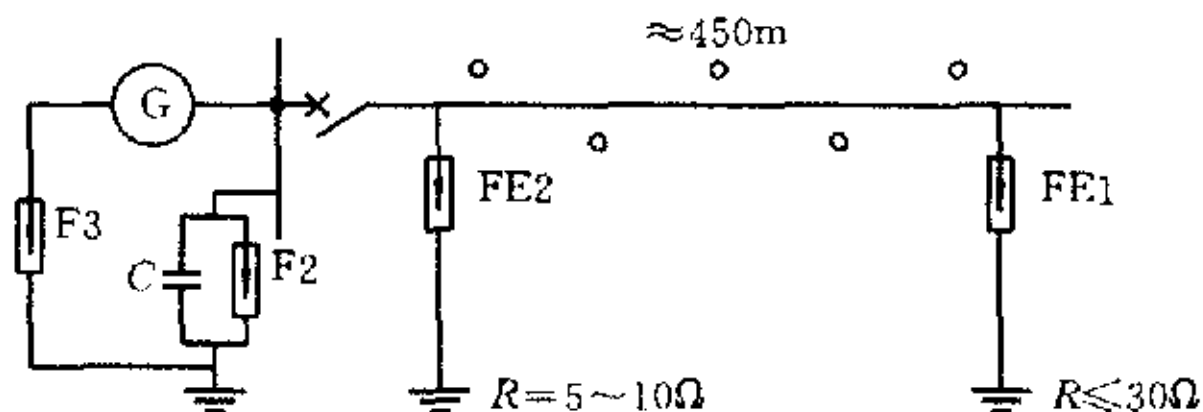
电容器宜有短路保护。



(a) 进线段采用 FE 的保护接线



(b) 进线段采用避雷线的保护接线



(c) 进线段采用避雷针的保护接线

图 24 1 500 kW 及以下直配电机的保护接线

9.12 无架空直配线的发电机,如发电机与升压变压器之间的母线桥或组合导线无金属屏蔽部分的长度大于 50 m,应采取防止感应过电压的措施,在发电机回路或母线的每相导线上装设不小于  $0.15 \mu\text{F}$  的电容器或旋转电机阀式避雷器。如已按 7.3.8 要求装设避雷器,则可不再采取措施,但该避雷器应选用旋转电机阀式避雷器。

9.13 在多雷区,经变压器与架空线路连接的非直配电机,如变压器高压侧的系统标称电压为 66 kV 及以下时,为防止雷电过电压经变压器绕组的电磁传递而危及电机的绝缘,宜在电机出线上装设一组旋转电机阀式避雷器。变压器高压侧的系统标称电压为 110 kV 及以上时,电机出线上是否装设避雷器可经校验确定。

## 10 绝缘配合

### 10.1 绝缘配合原则

10.1.1 按系统中出现的各种电压和保护装置的特性来确定设备绝缘水平,即进行绝缘配合时,应全面考虑设备造价、维修费用以及故障损失三个方面,力求取得较高的经济效益。

不同系统,因结构不同以及在不同的发展阶段,可以有不同的绝缘水平。

#### 10.1.2 工频运行电压和暂时过电压下的绝缘配合:

a) 工频运行电压下电气装置瓷外绝缘的爬电距离应符合相应环境污秽分级条件下的爬电比距要求。

b) 变电所电气设备应能承受一定幅值和时间的工频过电压和谐振过电压。

#### 10.1.3 操作过电压下的绝缘配合:

a) 范围 II 的架空线路确定其操作过电压要求的绝缘水平时,可用将过电压幅值和绝缘强度作为随

机变量的统计法,并且仅考虑空载线路合闸、单相重合闸和成功的三相重合闸(如运行中使用时)过电压。

b) 范围Ⅱ的变电所电气设备操作冲击绝缘水平以及变电所绝缘子串、空气间隙的操作冲击绝缘强度,以避雷器相应保护水平为基础,进行绝缘配合。配合时,对非自恢复绝缘采用惯用法;对自恢复绝缘则仅将绝缘强度作为随机变量。

c) 范围Ⅰ的架空线路和变电所绝缘子串、空气间隙的操作过电压要求的绝缘水平,以计算用最大操作过电压为基础进行绝缘配合。将绝缘强度作为随机变量处理。

#### 10.1.4 雷电过电压下的绝缘配合。

变电所中电气设备、绝缘子串和空气间隙的雷电冲击强度,以避雷器雷电保护水平为基础进行配合。配合时,对非自恢复绝缘采用惯用法,对自恢复绝缘仅将绝缘强度作为随机变量。

#### 10.1.5 用于操作雷电过电压绝缘配合的波形:

a) 操作冲击电压波。至最大值时间 250  $\mu$ s,波尾 2 500  $\mu$ s。

注

1 有绕组的电气设备除外。

2 当采用其他波形时,绝缘配合裕度应符合本标准要求。

b) 雷电冲击电压波。波头时间 1.2  $\mu$ s,波尾 50  $\mu$ s。

10.1.6 进行绝缘配合时,对于范围Ⅱ的送电线路、变电所的绝缘子串、空气间隙在各种电压下的绝缘强度,宜采用仿真型塔(构架)试验数据。

10.1.7 本标准中送电线路、变电所绝缘子串及空气间隙的绝缘配合公式均按标准气象条件给出。当送电线路、变电所因海拔高度引起气象条件变化而异于标准状态时,可参照附录 D 校正(海拔高度 1 000 m 及以下地区,按 1 000 m 条件校正),以满足绝缘配合要求,并有如下规定:

a) 空气间隙。不考虑雨的影响,仅进行相对空气密度和湿度的校正。

b) 绝缘子串。工频污秽放电电压暂不进行校正。

c) 操作冲击电压波放电电压。按以下两种方法校正,且按严苛条件取值:

1) 考虑雨使绝缘子正极性冲击电压波放电电压降低 5%(或采用实测数据),再进行相对空气密度校正;

2) 不考虑雨的影响,但进行相对空气密度和湿度的校正。

10.1.8 本标准中关于变电所电气设备绝缘配合的要求,适用于设备安装点海拔高度不超过 1 000 m。当设备安装点海拔高度超过 1 000 m 时,可参照 10.1.7 考虑对设备外绝缘的耐受电压要求。

10.1.9 污秽区电瓷外绝缘的爬电距离按 GB/T 16434—1997《高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准》执行。

10.1.10 范围Ⅰ的各电压级相对地计算用最大操作过电压的标么值应该选取下列数值:

35 kV 及以下低电阻接地系统	3.2
66 kV 及以下(除低电阻接地系统外)	4.0
110 kV 及 220 kV	3.0

3 kV~220 kV 电力系统,相间操作过电压宜取相对地过电压的 1.3~1.4 倍。

当采用金属氧化物避雷器限制操作过电压时,相对地及相间计算用最大操作过电压的标么值需经研究确定。

## 10.2 架空送电线路的绝缘配合

### 10.2.1 0 级污秽区线路绝缘子串

a) 每串绝缘子片数应符合工频电压的爬电距离要求,同时应符合操作过电压要求。

1) 由工频电压爬电距离要求的线路每串绝缘子片数应符合下式要求:

$$m \geq \frac{\lambda U_m}{K_e L_0} \dots\dots\dots (23)$$



式中:  $m$ ——每串绝缘子片数;

$U_m$ ——系统最高电压, kV;

$\lambda$ ——爬电比距, 330 kV 及以上为 1.45, 220 kV 及以下为 1.39, cm/kV;

$L_0$ ——每片悬式绝缘子的几何爬电距离, cm;

$K_e$ ——绝缘子爬电距离的有效系数, 主要由各种绝缘子爬电距离在试验和运行中提高污秽耐压的有效性来确定; 并以 XP-70 型绝缘子作为基础, 其  $K_e$  值取为 1。

几何爬电距离 305 mm 的 XP1-160 型绝缘子的  $K_e$  暂取为 1。采用其它型式绝缘子时,  $K_e$  应由试验确定。

2) 操作过电压要求的线路绝缘子串正极性操作冲击电压波 50% 放电电压  $\bar{u}_{s,1,1}$  应符合式(24)的要求:

$$\bar{u}_{s,1,1} \geq K_1 U_0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:  $U_0$ ——对范围 II 为线路相对地统计操作过电压, 采用空载线路合闸、单相重合闸和成功的三相重合闸(如运行中使用)中的较高值; 对范围 I 为计算用最大操作过电压, kV;

$K_1$ ——线路绝缘子串操作过电压统计配合系数, 对范围 II 取 1.25, 对范围 I 取 1.17。

### 10.2.2 线路(受风偏影响的)导线对杆塔的空气间隙:

绝缘子串风偏后, 导线对杆塔的空气间隙应分别符合工频电压要求[见式(25)]、操作过电压要求[见式(26)]及雷电过电压要求。

悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数按附录 B 确定。

a) 风偏后线路导线对杆塔空气间隙的工频 50% 放电电压  $\bar{u}_{i,s}$  应符合式(25)要求:

$$\bar{u}_{i,s} \geq K_2 u_m / \sqrt{3} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:  $K_2$ ——线路空气间隙工频电压统计配合系数, 对范围 II 取 1.40; 对 110 kV 及 220 kV 取 1.35, 对 66 kV 及以下取 1.20。

风偏计算用的风速取线路设计最大风速。

b) 风偏后线路导线对杆塔空气间隙的正极性操作冲击电压波 50% 放电电压  $\bar{u}_{s,1,s}$  应符合式(26)要求:

$$\bar{u}_{s,1,s} \geq K_3 U_0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:  $K_3$ ——线路空气间隙操作过电压统计配合系数, 对范围 II 取 1.1; 对范围 I 取 1.03。

风偏计算用的风速取线路设计最大风速的 0.5 倍。

c) 风偏后线路导线对杆塔空气间隙的正极性雷电冲击电压波 50% 放电电压, 可选为绝缘子串相应电压的 0.85 倍(污秽区该间隙可仍按 0 级污秽区配合)。

风偏计算用的风速, 对于线路设计最大风速小于 35 m/s 的地区, 一般采用 10 m/s; 最大风速在 35 m/s 及以上以及雷暴时风速较大的地区, 一般采用 15 m/s。

10.2.3 送电线路采用 V 型绝缘子串时, V 型串每一分支的绝缘子片数应符合式(23)的要求。导线对杆塔的空气间隙应符合以下三种电压要求:

a) 工频电压。按式(25)确定, 但  $K_2$  对范围 II 取 1.50; 对 110 kV 及 220 kV 取 1.40, 对 66 kV 及以下取 1.30。

b) 操作过电压。按式(26)确定, 但  $K_3$  对范围 II 取 1.25; 对范围 I 取 1.17。

c) 雷电过电压。应符合 6.1.3 线路耐雷水平的要求。

10.2.4 海拔不超过 1 000 m 地区架空送电线路绝缘子串及空气间隙不应小于表 15 所列数值。在进行绝缘配合时, 考虑杆塔尺寸误差、横担变形和拉线施工误差等不利因素, 空气间隙应留有一定裕度。

表 15 线路绝缘子每串最少片数和最小空气间隙 cm

系统标称电压,kV	20	35	66	110	220	330	500
雷电过电压间隙	35	45	65	100	190	230(260)	330(370)
操作过电压间隙	12	25	50	70	145	195	270
工频电压间隙	5	10	20	25	55	90	130
悬垂绝缘子串的绝缘子个数	2	3	5	7	13	17(19)	25(28)
注							
1 绝缘子型式:一般为 XP 型;330 kV、500 kV 括号内、外分别为 XP1 和 XP2 型。							
2 绝缘子适用于 0 级污秽。污秽地区绝缘加强时,间隙一般仍用表中的数值。							
3 330 kV、500 kV 括号内雷电过电压间隙与括号内绝缘子个数相对应,适用于发电厂、变电所进线保护段杆塔。							

10.2.5 范围Ⅱ的线路绝缘在操作过电压下的闪络率的计算方法可参照附录 E。

10.2.6 具有一般高度杆塔的架空送电线路,雷击跳闸率可按附录 C 计算。

10.3 变电所绝缘子串及空气间隙的绝缘配合

10.3.1 变电所绝缘子串

清洁区变电所绝缘子串应同时符合以下三种电压要求:

a) 由工频电压爬电距离要求的变电所每串绝缘子片数参照式(23)确定。其中爬电比距λ,对Ⅰ级污秽区取同级线路的1.1倍。

b) 变电所操作过电压要求的变电所绝缘子串正极性操作冲击电压波50%放电电压 $\bar{u}_{s,s,i}$ 应符合式(27)要求且不得低于变电所电气设备中隔离开关、支柱绝缘子的相应值。

$$\bar{u}_{s,s,i} = \frac{U_{p,1}}{1 - 3\sigma_s} \geq K_4 U_{p,1} \dots\dots\dots (27)$$

式中:  $U_{p,1}$ ——对范围Ⅱ为线路型避雷器操作过电压保护水平;对范围Ⅰ则代之以计算用最大操作过电压[式(29)、式(30)和式(33)同此],kV;

$\sigma_s$ ——绝缘子串在操作过电压下放电电压的变异系数,5%;

$K_4$ ——变电所绝缘子串操作过电压配合系数,取1.18。

c) 雷电过电压要求的变电所绝缘子串正极性雷电冲击电压波50%放电电压 $\bar{u}_i$ 应符合式(28)要求,且不得低于变电所电气设备中隔离开关、支柱绝缘子的相应值。

$$\bar{u}_i \geq K_5 U_R \dots\dots\dots (28)$$

式中:  $U_R$ ——避雷器(对范围Ⅱ为线路型)在标称雷电流下的额定残压值(对500 kV、330 kV 和 220 kV 以及 3 kV~110 kV 分别取标称雷电流为 20 kA、10 kA 和 5 kA),kV;

$K_5$ ——变电所绝缘子串雷电过电压配合系数,取1.45。

10.3.2 变电所导线对构架的空气间隙

空气间隙受导线风偏影响时,各种电压下用于绝缘配合的风偏角计算风速的选用原则与送电线路相同。

变电所导线对构架的受风偏及不受风偏影响的空气间隙应符合下列各项要求:

a) 变电所相对地空气间隙(包括不受风偏影响的间隙)与工频电压的配合和送电线路相同,见10.2.2 a)。

b) 变电所相对地空气间隙的正极性操作冲击电压波50%放电电压 $\bar{u}_{s,s,s}$ 应符合式(29)要求:

$$\bar{u}_{s,s,s} = \frac{U_{p,1}}{1 - 2\sigma_{s,s}} \geq K_6 U_{p,1} \dots\dots\dots (29)$$

$$\bar{u}_{s,s,s} = \frac{U_{p,1}}{1 - 3\sigma_{s,s}} \geq K_6 U_{p,1} \dots\dots\dots (30)$$

式中： $\sigma_{s,s}$ ——变电所相对地空气间隙在操作过电压下放电电压的变异系数，5%；

$K_6$ ——变电所相对地空气间隙操作过电压配合系数，有风偏间隙取 1.1〔式(29)〕，无风偏间隙取 1.18〔式(30)〕。

c) 变电所相对地空气间隙的正极性雷电冲击电压波 50%放电电压  $\bar{u}_{1,s}$  应符合式(31)要求：

$$\bar{u}_{1,s} \geq K_7 U_R \dots\dots\dots (31)$$

式中： $K_7$ ——变电所相对地空气间隙雷电过电压配合系数，有风偏间隙取 1.4；无风偏间隙取 1.45。

10.3.3 变电所相间空气间隙

a) 变电所相间空气间隙的工频 50%放电电压  $\bar{u}_{i,p,s}$  应符合式(32)要求：

$$\bar{u}_{i,p,s} \geq K_2 U_m \dots\dots\dots (32)$$

b) 范围Ⅱ 变电所相间空气间隙的 50%操作冲击电压波放电电压  $\bar{u}_{s,p,s}$  应符合式(33)要求：

$$\bar{u}_{s,p,s} = \frac{K_8 U_{p,1}}{1 - 3\sigma_{s,p}} \geq K_9 U_{p,1} \dots\dots\dots (33)$$

式中： $\sigma_{s,p}$ ——相间空气间隙在操作过电压下放电电压的变异系数，3.5%；

$K_8$ ——相间与相对地过电压的比值，对范围Ⅱ 取 1.7，对范围Ⅰ 取 1.4；

$K_9$ ——变电所相间空气间隙操作过电压配合系数，对范围Ⅱ 取 1.9，对范围Ⅰ 取 1.6。

c) 变电所的雷电过电压相间空气间隙可取相应对地间隙的 1.1 倍。

10.3.4 变电所的最小空气间隙

a) 海拔不超过 1 000 m 地区变电所工频电压要求的最小空气间隙如表 16 所示。其中对于 330 kV 和 500 kV 为参考值。

b) 对于海拔不超过 1 000 m 地区变电所操作和雷电过电压要求的最小空气间隙如表 17 所示。其中对于 330 kV 和 500 kV 为参考值。

c) 海拔不超过 1 000 m 地区 3 kV~20 kV 高压配电装置的最小户外、户内的相对地、相间空气间隙如表 18 所示。

表 16 变电所工频电压要求的最小空气间隙 cm

系统标称电压,kV	相 对 地	相 间
35	15	15
66	30	30
110	30	50
220	60	90
330	110	170
500	160	240

表 17 变电所操作和雷电过电压要求的间隙 cm

系统标称电压 kV	操作过电压		雷电过电压	
	相对地	相 间	相对地	相 间
35	40	40	40	40
66	65	65	65	65
110	90	100	90	100
220	180	200	180	200
330	230	270	220	240
500	350	430	320	360

表 18 3 kV~20 kV 高压配电装置的空气间隙 cm

系统标称电压,kV	户 外	户 内
3	20	7.5
6	20	10
10	20	12.5
15	30	15
20	30	18

注：相对地、相间取同一值。

10.4 变电所电气设备的绝缘配合

10.4.1 变电所电气设备与工频电压的配合

a) I 级污秽区变电所电气设备户外电瓷绝缘的爬电比距 λ 不应小于 1.60 cm/kV(户外电瓷绝缘的瓷件平均直径  $D_m < 300\text{ mm}$ )。不同  $D_m$  的爬电距离按式(34)计算：

$$L \geq K_d \lambda U_m \dots\dots\dots (34)$$

式中：L——电气设备户外电瓷绝缘的几何爬电距离,cm；

$K_d$ ——电气设备户外电瓷绝缘爬电距离增大系数。

$K_d$  与瓷件直径  $D_m$  有关,对应不同的  $D_m$ ,宜采用如下的爬电距离增大系数  $K_d$ ：

$D_m < 300\text{ mm}$	$K_d = 1.0$
$300\text{ mm} \leq D_m \leq 500\text{ mm}$	$K_d = 1.1$
$D_m > 500\text{ mm}$	$K_d = 1.2$

断路器同极断口间灭弧室瓷套的爬电比距不应小于对地爬电比距要求值的 1.15(252 kV)或 1.2(363 kV、550 kV)倍。

b) 为保证变压器内绝缘在正常运行工频电压作用下的工作可靠性,应进行长时间工频耐压试验。变压器耐压值为 1.5 倍系统最高相电压。

10.4.2 变电所电气设备应能承受一定幅值和时间的工频过电压和谐振过电压。

10.4.3 范围Ⅱ 变电所电气设备与操作过电压的绝缘配合

a) 电气设备内绝缘：

- 1) 电气设备内绝缘相对地额定操作冲击耐压与避雷器操作过电压保护水平间的配合系数不应小于 1.15。
- 2) 变压器内绝缘相间额定操作冲击耐压应取其等于内绝缘相对地额定操作冲击耐压的 1.5 倍。
- 3) 断路器同极断口间内绝缘额定操作冲击耐压  $U_{s,d}$ 应符合式(35)要求：

$$U_{s,d} \geq 1.15U_{p,1} + \sqrt{2}U_m / \sqrt{3} \dots\dots\dots (35)$$

b) 电气设备外绝缘：

- 1) 电气设备外绝缘相对地干态额定操作冲击耐压与相应设备的内绝缘额定操作冲击耐压相同。淋雨耐压值可低 5%。
- 2) 变压器外绝缘相间干态额定操作冲击耐压与其内绝缘相间额定操作冲击耐压相同。
- 3) 断路器、隔离开关同极断口间外绝缘额定操作冲击耐压与断路器断口间内绝缘的相应值相同。

10.4.4 变电所电气设备与雷电过电压的绝缘配合

a) 变压器内、外绝缘的全波额定雷电冲击耐压与变电所避雷器标称放电电流[参见 10.3.1 c)]下的残压间的配合系数取 1.4。

b) 并联电抗器、高压电器、电流互感器、单独试验的套管、母线支持绝缘子及电缆和其附件等的全波额定雷电冲击耐压与避雷器标称放电电流[参见 10.3.1 c)]下的残压间的配合系数取 1.4。

c) 变压器、并联电抗器及电流互感器截波额定雷电冲击耐压取相应设备全波额定雷电冲击耐压的 1.1 倍。



d) 断路器同极断口间内绝缘以及断路器、隔离开关同极断口间外绝缘的全波雷电冲击耐压  $U_{1.d}$  应符合式(36)要求:

$$U_{1.d} \geq U_{1.e} + U_m / \sqrt{3} \dots\dots\dots (36)$$

式中:  $U_{1.e}$ ——断路器、隔离开关全波额定雷电冲击耐压, kV。

10.4.5 电气设备耐受电压的选择

对 3 kV~500 kV 电气设备随其所在系统接地方式的不同、暂时过电压的差别及所选用的保护用阀式避雷器型式、特性的差异,将有不同的耐受电压要求。以下各表所列耐受电压数据适用于海拔高度 1 000 m 及以下地区的电气设备。

a) 电压范围 I ( $3.6 \text{ kV} < U_m \leq 252 \text{ kV}$ ) 电气设备选用的耐受电压。表 19 给出了相应数据。

表 19 电压范围 I 电气设备选用的耐受电压

系统标称 电压 kV	设备最高 电压 kV	设备类别	雷电冲击耐受电压 kV				短时(1 min)工频耐受电压(有效值) kV			
			相对地	相 间	断 口		相对地	相 间	断 口	
					断路器	隔离开关			断路器	隔离开关
3	3.6	变压器	40	40	—	—	20	20	—	—
		开关	40	40	40	46	25	25	25	27
6	7.2	变压器	60(40)	60(40)	—	—	25(20)	25(20)	—	—
		开关	60(40)	60(40)	60	70	30(20)	30(20)	30	34
10	12	变压器	75(60)	75(60)	—	—	35(28)	35(28)	—	—
		开关	75(60)	75(60)	75(60)	85(70)	42(28)	42(28)	42(28)	49(35)
15	18	变压器	105	105	—	—	45	45	—	—
		开关	105	105	115	—	46	46	56	—
20	24	变压器	125(95)	125(95)	—	—	55(50)	55(50)	—	—
		开关	125	125	125	145	65	65	65	79
35	40.5	变压器	185/200	185/200	—	—	80/85	80/85	—	—
		开关	185	185	185	215	95	95	95	118
66	72.5	变压器	350	350	—	—	150	150	—	—
		开关	325	325	325	375	155	155	155	197
110	126	变压器	450/480	450/480	—	—	185/200	185/200	—	—
		开关	450、550	450、550	450、550	520、630	200、230	200、230	200、230	225、265
220	252	变压器	850、950	850、950	—	—	360、395	360、395	—	—
		开关	850、950	850、950	850、950	950、1 050	360、395	360、395	360、395	410、460

- 注
- 1 分子、分母数据分别对应外绝缘和内绝缘。
  - 2 括号内和外数据分别对应是和非低电阻接地系统。
  - 3 开关类设备将设备最高电压称作“额定电压”。

b) 电压范围 I ( $U_m > 252 \text{ kV}$ ) 电气设备选用的耐受电压。表 20 给出了相应数据。

表 20 电压范围 I 电气设备选用的耐受电压

系统标称电压 kV	设备最高电压 kV	雷电冲击耐受电压 kV		操作冲击耐受电压 kV			短时(1 min)工频耐受 电压(有效值) kV	
		相对地	断 口	相对地	相 间	断 口	相对地	断 口
330	363	1 050	1 050+205	850	1 300	850+295	460	520
		1 175	1 175+205	950	1 425		510	580
500	550	1 425	1 425+315	1 050	1 675	1 050+450	630	790
		1 550	1 550+315	1 175	1 800		680	790

c) 电力变压器、高压并联电抗器中性点及其接地电抗器选用的耐受电压。表 21 给出了相应数据。

表 21 电力变压器、高压并联电抗器中性点及其接地电抗器选用的耐受电压

系统标称电压 kV	系统最高电压 kV	中性点接地方式	雷电全波和截波 耐受电压	短时工频耐受电压(有效值) kV
110	126	—	250	95
220	252	直接接地	185	85
		经接地电抗器接地	185	85
		不接地	400	200
330	363	直接接地	185	85
		经接地电抗器接地	250	105
500	550	直接接地	185	85
		经接地电抗器接地	325	140

注：中性点经接地电抗器接地时，其电抗值与变压器或高压并联电抗器的零序电抗之比小于等于 1/3。

附录 A  
(标准的附录)

变电所电气设备耐受工频过电压、谐振过电压的要求

A1 国产 500 kV 电气设备要求

对变压器、并联电抗器、电容式电压互感器及耦合电容器等耐受工频过电压、谐振过电压的要求分别见表 A1 及表 A2。

表 A1 变压器、电容式电压互感器及耦合电容器耐受电压标么值及允许时间

时 间	连续	8 h	2 h	30 min	1 min	30 s
变压器	1.1	—	—	1.2	1.3	—
电容式电压互感器	1.1	1.2	1.3	—	—	1.5
耦合电容器	—	—	1.3	—	—	1.5

注：变压器耐受电压以相应分接头下额定电压为 1.0 标么值，余以设备最高相电压为 1.0 标么值。

表 A2 并联电抗器耐受电压标么值及允许时间

时 间	120 min	60 min	40 min	20 min	10 min	3 min	1 min	20 s	3 s
备用状态下投入	1.15	—	1.20	1.25	1.30	—	1.40	1.50	—
运行状态	—	1.15	—	1.20	1.25	1.30	—	1.40	1.50

注：电压 1.0 标么值为设备最高相电压。

A2 前苏联国家标准对运行中电气设备要求

A2.1 运行中变电所电气设备耐受工频过电压、谐振过电压的要求见表 A3。当过电压为工频正弦波时，表中过电压标么值对于相间或相对地分别为设备最高电压或设备最高相对地电压的倍数；当过电压含有谐波电压分量而与工频正弦波形有区别时，表中标么值对于相间或相对地则分别为设备最高电压峰值或设备最高相对地电压峰值的倍数。

A2.2 在满足表 A3 的条件下，对过电压出现次数有如下规定：

- a) 过电压持续时间在 1 s 及以下时，次数不作规定；
- b) 过电压持续时间 20 s 时，在电气设备使用期限内(无具体规定时，按 25 年考虑)，不应大于 100 次，但一年内不得多于 15 次，一昼夜不得多于两次；
- c) 过电压持续时间 20 min 时，一年内不应超过 50 次；
- d) 对于 20 s 和 20 min 的情况，两次之间的时间间隔应不小于 1 h。

如某处已发生两次(间隔大于 1 h)每次持续 20 min 的过电压，第三次这种过电压的出现不得在 24 h 之内，在事故情况下，也不得在 20 h 内出现。

A2.3 过电压持续时间大于 0.5 s 且介于表 A3 的两个时间之间时，过电压标么值按表中较大时间的相应过电压标么值考虑。

持续时间大于 0.1 s 而小于或等于 0.5 s 时，过电压可按  $U_1 + 0.03 \times (U_{0.1} - U_1)$  计算。其中  $U_1$  和  $U_{0.1}$  分别为表 A3 中 1 s、0.1 s 时的过电压标么值。

注：来源自前苏联 ГОСТ 1516.1—76《3~500 kV 交流电气设备绝缘强度要求》，1980。

表 A3 变电所电气设备耐受工频过电压、谐振过电压(标么值)的要求

时 间	20 min		20 s		1 s		0.1 s	
部 位	相 间	相对地	相 间	相对地	相 间	相对地	相 间	相对地
变压器 (包括自耦变压器)	1.10	1.10	1.25	1.25	1.50	1.90	1.58	2.00
并联电抗器	1.15	1.15	1.35	1.35	1.50	2.00	1.58	2.08
高压电器、电容式电压互感器、电流互感器、耦合电容器、母线支柱绝缘子	1.15	1.15	1.6	1.6	1.7	2.20	1.8	2.40

附 录 B

(标准的附录)

架空线路悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数

悬垂绝缘子串风偏角计算用风压不均匀系数  $\alpha$  按下式计算:

$$\alpha = 5.543(v\sin\theta)^{-0.737}$$

式中:  $v$ ——设计采用的 10 min 平均风速(大于 20 时,仍采用 20),m/s;

$\theta$ ——风向与线路方向的夹角。

表 B1 给出了  $\theta=90^\circ$  时几种风速下的风压不均匀系数。

表 B1 风压不均匀系数

设计风速, m/s	$\leq 10$	15	20	$> 20$
$\alpha$	1.0	0.75	0.61	0.61

附 录 C

(标准的附录)

雷电过电压计算的一些参数和方法

C1 雷电流幅值的概率

a) 除 b) 所述地区以外的我国一般地区雷电流幅值超过  $I$  的概率可按下式求得:

$$\lg P = - \frac{I}{88} \dots\dots\dots (C1)$$

式中:  $P$ ——雷电流幅值概率;

$I$ ——雷电流幅值, kA。

b) 陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区(这类地区的平均年雷暴日数一般在 20 及以下)雷电流幅值较小,可由下式求得:

$$\lg P = - \frac{I}{44} \dots\dots\dots (C2)$$

C2 雷击点电压的计算,系假设数值和形状都保持不变的雷电流通过与该点连接的全部阻抗,例如通过杆塔、杆塔的接地装置以及通向相邻杆塔的避雷线等。

雷击导线或避雷线档距中央,其电位的计算系假设雷击瞬间电流幅值减小为雷电流幅值的二分之一。然后由于来自相邻杆塔的电波反射,使电流增大;同时假设避雷线或导线上的电流经过雷击点时没



有任何反射。

在耐雷水平计算中,波阻抗也可以用集中电感代替,这与用多次反射法算得的结果相近。

C3 雷击杆塔时,单根导线和避雷线的波阻取 400 Ω,两根避雷线的波阻取 250 Ω。这些数字是当杆塔上导线和避雷线的位置在标准情况下取得的,同时假设由于电晕的作用,波阻降低 20%~30%。不需要在各种情况下单独确定这些数字。雷击杆塔时,导线和避雷线的电位较低,电晕作用较小,波的传播速度等于光速。

雷击避雷线档距中间时的电位比雷击杆塔时高许多。电晕作用较大,在计算中取避雷线的波阻等于 350 Ω,计算用电波传播的相速取光速的 75%。

导线和避雷线间的耦合系数  $k$  因电晕效应而增大,可按下式计算:

$$k = k_1 k_0 \dots\dots\dots (C3)$$

式中:  $k_0$ ——导线和避雷线间的几何耦合系数,决定于导线和避雷线的几何尺寸及其排列位置;

$k_1$ ——电晕效应校正系数。

雷直击塔顶时,校正系数  $k_1$  可参考表 C1 所列数值。

表 C1 雷直击塔顶时的校正系数  $k_1$

标称电压,kV	20~35	66~110	220~330	500
双避雷线	1.1	1.2	1.25	1.28
单避雷线	1.15	1.25	1.3	—

雷击避雷线档距中间时,校正系数可取 1.5。

导线波阻和几何耦合系数应按下列方法计算。

a) 多根平行线(图 C1)中,线 1 的自波阻为:

$$Z_{11} = 60 \ln \frac{2h_1}{r_1} \dots\dots\dots (C4)$$

式中:  $r_1$ ——线 1 的半径;

$h_1$ ——线 1 的平均高度。

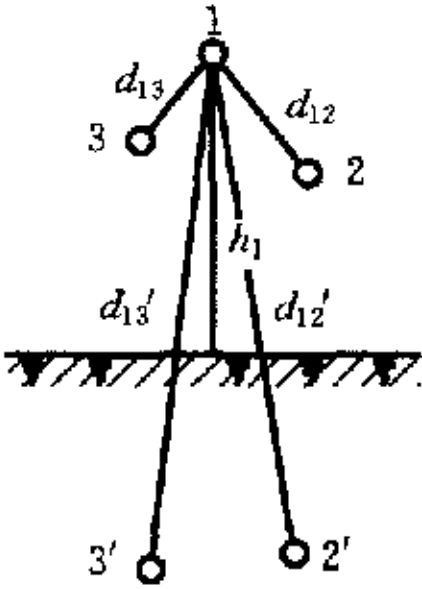


图 C1 多根平行线及其镜像

线 1 与线 3 的互波阻为:

$$Z_{13} = 60 \ln \frac{d_{13'}}{d_{13}} \dots\dots\dots (C5)$$

式中:  $d_{13}$ ——线 1 和线 3 间的距离;

$d_{13'}$ ——线 1 与线 3 的镜像 3' 间的距离。

$d_{12}$ 、 $d_{12'}$  和  $d_{23'}$  的意义类推。

线 1 对线 3 的几何耦合系数为:

$$k_{13} = \frac{Z_{13}}{Z_{11}} = \frac{\ln \frac{d_{13'}}{d_{13}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} \dots\dots\dots (C6)$$

线 1 和线 2 共同对线 3 的几何耦合系数为:

$$k_{12,3} = \frac{Z_{13} + Z_{23}}{Z_{11} + Z_{12}} = \frac{\ln \frac{d_{13'}}{d_{13}} + \ln \frac{d_{23'}}{d_{23}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1} + \ln \frac{d_{12'}}{d_{12}}} \dots\dots\dots (C7)$$

b) 杆塔的波阻及等值电感可取表 C2 所列数值。

表 C2 杆塔的波阻和电感的参考值

杆塔型式	杆塔波阻, $\Omega$	杆塔电感, $\mu\text{H}/\text{m}$
无拉线钢筋混凝土单杆	250	0.84
有拉线钢筋混凝土单杆	125	0.42
无拉线钢筋混凝土双杆	125	0.42
铁塔	150	0.50
门型铁塔	125	0.42
有两条引下线的门型木杆	250	0.84
有四条引下线的 AH 型木杆	180	0.60

C4 雷击杆塔时,不仅有雷电流通过杆塔并在塔顶产生电位  $u_{\text{top}}$ ,同时,空中迅速变化的电磁场还在导线上感应一相反符号的感应过电压  $u_i$ 。在无避雷线时,对一般高度的线路,感应过电压的最大值可按下式计算:

$$u_{i,m} = ah_c \dots\dots\dots (C8)$$

式中:  $u_{i,m}$ ——雷击杆塔时感应过电压最大值, kV;

$h_c$ ——导线平均高度, m;

$a$ ——感应过电压系数,其值等于以 kA/ $\mu\text{s}$  计的雷电流陡度值。

无避雷线的杆塔,绝缘承受的过电压瞬时值为:

$$u_{1,i} = u_a + u_i \dots\dots\dots (C9)$$

式中:  $u_{1,i}$ ——绝缘承受的过电压瞬时值;

$u_a$ ——横担高度处杆塔电压。

有避雷线的杆塔,绝缘承受的过电压瞬时值为:

$$u_{1,i} = (u_a - u_{\text{top}}k) + u_i \left( 1 - \frac{h_g}{h_c} k_0 \right) \dots\dots\dots (C10)$$

式中:  $h_g$ ——避雷线对地平均高度, m。

C5 地面落雷密度( $\gamma$ ),即每平方公里、每雷电日( $d$ )的地面落雷次数,世界各国取值不同。我国各地平均年雷暴日数( $T_d$ )不同的地区  $\gamma$  值也不相同。一般,  $T_d$  较大的地区,其  $\gamma$  值也随之变大。本标准对  $T_d=40$  的地区  $\gamma$  值取 0.07。  $T_d=40$  的地区避雷线或导线平均高度为  $h$  的线路,每 100 km 每年的雷击次数为:

$$N_L = 0.28(b + 4h) \dots\dots\dots (C11)$$

式中:  $b$ ——两根避雷线之间的距离, m。

#### C6 电晕对雷电波波形的影响

变电所一般用避雷线保护送电线路的进线段,以限制进入变电所的雷电波的幅值和陡度。降低电波的陡度,主要依靠电晕效应使波头拉长,从而允许增大阀式避雷器与变压器及电器等被保护设备间的最大电气距离。

雷电波因电晕效应变形后,波头的长度可按下式计算:

$$\tau = \tau_0 + \left( 0.5 + \frac{0.008U_w}{h_c} \right) l_p \quad \dots\dots\dots (C12)$$

式中:  $\tau$ ——进线保护段末端变形后斜角波波头的长度,  $\mu\text{s}$ ;

$\tau_0$ ——进线保护段首端斜角波波头的长度,  $\mu\text{s}$ ;

$l_p$ ——进线保护段长度,  $\text{km}$ ;

$U_w$ ——进行波的幅值,  $\text{kV}$ 。

对两分裂导线, 可将式(C12)计算结果减 10%。

#### C7 雷击有避雷线路杆塔顶部时耐雷水平的确定

雷击杆塔顶部时, 有避雷线路杆塔上绝缘承受的过电压最大值为:

$$u_{l.i.m} = (u_{a.m} - u_{top.m}k) + u_{i.m} \left( 1 - \frac{h_g}{h_c} k_0 \right) \quad \dots\dots\dots (C13)$$

式中:  $u_{l.i.m}$ ——杆塔上绝缘承受的过电压最大值,  $\text{kV}$ ;

$u_{top.m}$ ——杆顶电压最大值;

$u_{a.m}$ ——横担高度处杆塔电压最大值。

杆塔顶部电位的瞬时值与通过杆塔的电流瞬时值有关, 而通过杆塔的电流瞬时值与总雷电流的关系可用下式表示:

$$i_t = \beta i \quad \dots\dots\dots (C14)$$

式中:  $i_t$ ——通过杆塔的电流瞬时值,  $\text{kA}$ ;

$i$ ——总雷电流瞬时值,  $\text{kA}$ ;

$\beta$ ——杆塔分流系数, 可由图 C2 的电路算出。  $L_g$  为杆塔两侧相邻档避雷线的电感并联值,  $\mu\text{H}$ 。对单避雷线  $L_g$  约等于  $0.67l$ , 对双避雷线, 约等于  $0.42l$ 。  $l$  为档距长度,  $\text{m}$ 。  $L_t$  为杆塔电感,  $\mu\text{H}$ 。  $R_t$  为杆塔冲击接地电阻,  $\Omega$ 。

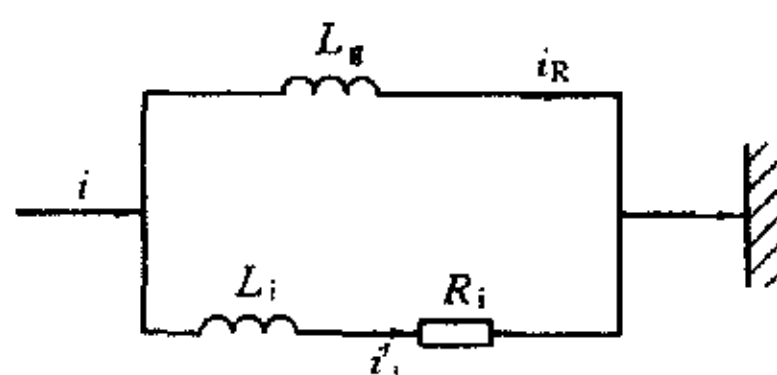


图 C2 计算杆塔分流系数用的电路

如取雷电流波头为斜角波, 则杆塔中的雷电流波头也可近似取为斜角波, 杆塔分流系数  $\beta$  为:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{L_t}{L_g} + \frac{R_t}{L_g} \times \frac{\tau_t}{2}} \quad \dots\dots\dots (C15)$$

式中:  $\tau_t$ ——雷电流波头长度, 取  $2.6 \mu\text{s}$ 。

对一般长度的档距,  $\beta$  可参考表 C3 所列数值。

表 C3 一般长度的档距的线路杆塔分流系数  $\beta$

系统标称电压, $\text{kV}$	避雷线根数	$\beta$ 值	系统标称电压, $\text{kV}$	避雷线根数	$\beta$ 值
110	单避雷线	0.90	330	双避雷线	0.88
	双避雷线	0.86			
220	单避雷线	0.92	500	双避雷线	0.88
	双避雷线	0.88			

雷击杆塔顶部时, 杆塔横担高度处杆塔电位最大值为:

$$u_{a.m} = \beta \left( IR_t + aL_t \frac{h_g}{h_t} \right) \quad \dots\dots\dots (C16)$$

式中： $h_t$ ——杆塔高度，m；

$h_s$ ——横担对地高度，m。

将式(C8)和式(C16)代入式(C13)，得到杆塔上绝缘承受的过电压最大值为：

$$u_{1,i,m} = (1-k)\beta R_i + \left(\frac{h_s}{h_t} - k\right)\beta a L_i + \left(1 - \frac{h_s}{h_c} k_0\right) a h_c$$

如  $u_{1,i,m}$  大于绝缘子串的 50% 冲击放电电压  $u_{50\%}$ ，则将发生闪络。取  $u_{1,i,m} = u_{50\%}$ ，即可求出雷击杆塔顶部时的耐雷水平  $I_1$ 。

如取固定波头长度  $\tau_1 = 2.6 \mu s$ ，则  $a = \frac{I_1}{2.6}$ ，此时耐雷水平为：

$$I_1 = \frac{u_{50\%}}{(1-k)\beta R_i + \left(\frac{h_s}{h_t} - k\right)\beta \frac{I_1}{2.6} + \left(1 - \frac{h_s}{h_c} k_0\right) \frac{h_c}{2.6}} \quad \dots\dots\dots (C17)$$

### C8 绕击率的确定

线路运行经验、现场实测和模拟试验均证明，雷电绕过避雷线直击导线的概率与避雷线对边导线的保护角、杆塔高度以及线路经过地区的地形、地貌、地质条件有关。平原和山区线路的绕击率与保护角和杆塔高度的关系曲线见图 C3。

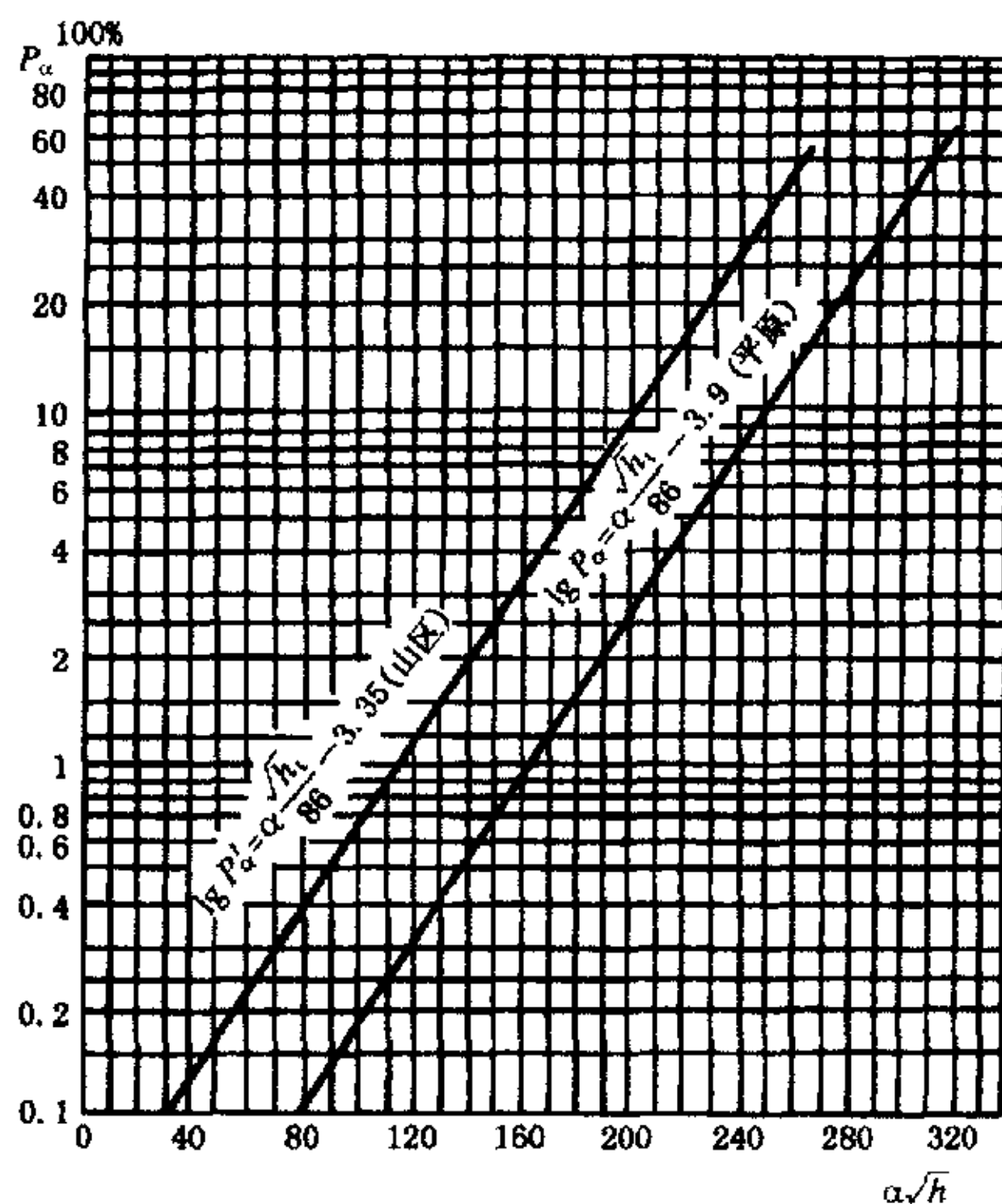


图 C3 绕击率与保护角和杆塔高度的关系

图中的绕击率曲线也可用下式表示：

对平原线路：

$$\lg P_a = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.9 \quad \dots\dots\dots (C18)$$

对山区线路：

$$\lg P'_a = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.35 \quad \dots\dots\dots (C19)$$

式中： $\alpha$ ——避雷线对边导线的保护角。

山区线路的绕击率约为平地线路的 3 倍，或相当于保护角增大  $8^\circ$  的情况。



## C9 建弧率的确定

绝缘子串和空气间隙在冲击闪络之后,转变为稳定的工频电弧的概率与沿绝缘子串和空气间隙的平均运行电压梯度有关。图 C4 中的建弧率曲线是根据实验室试验数据和线路运行经验的分析结果绘出的。建弧率与平均运行电压梯度的关系也可用下式表示:

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots (C20)$$

式中:  $\eta$ ——建弧率;

$E$ ——绝缘子串的平均运行电压(有效值)梯度, kV/m。

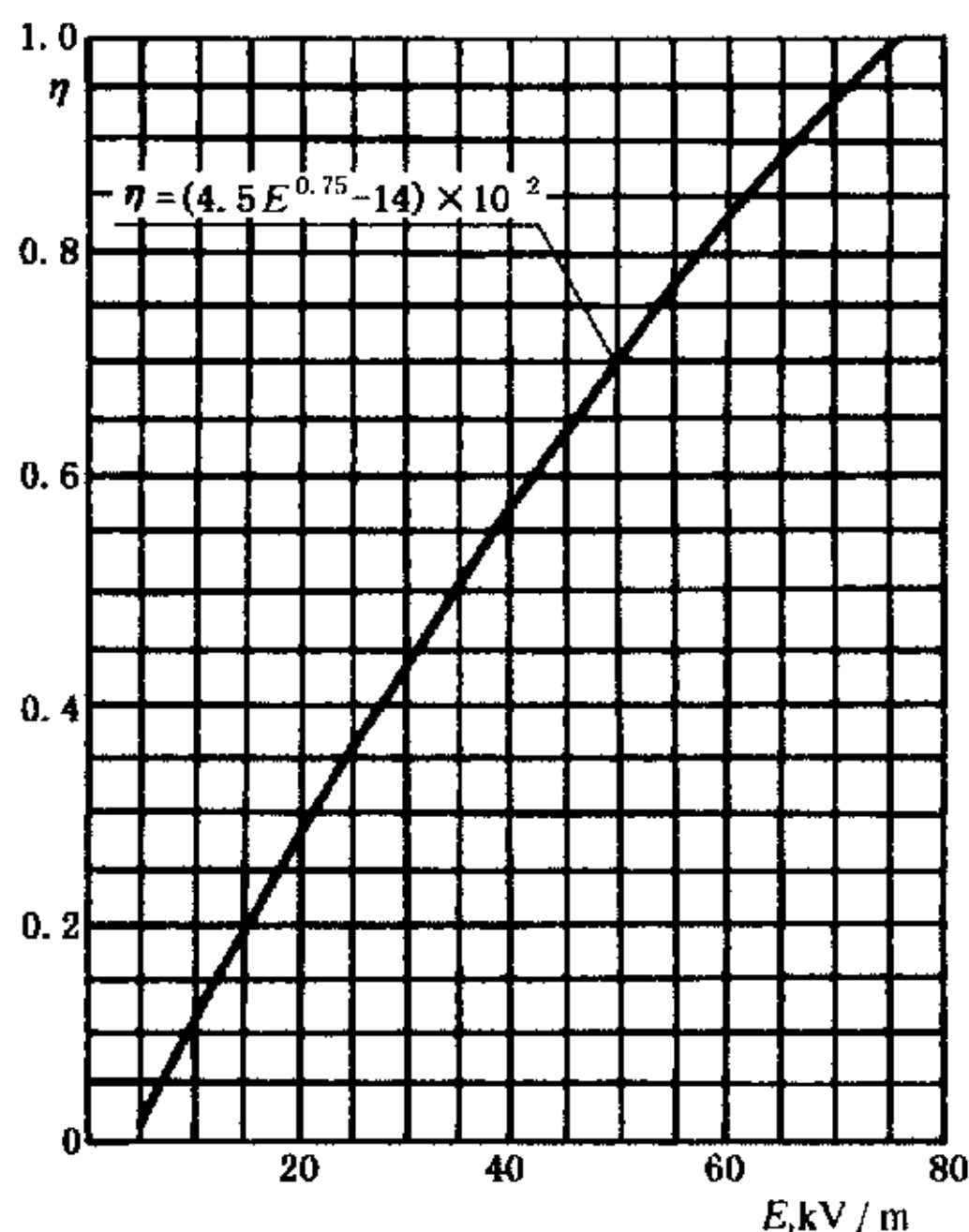


图 C4 建弧率与平均运行电压梯度的关系

对有效接地系统,有

$$E = \frac{U_n}{\sqrt{3}l_i} \quad \dots\dots\dots (C21)$$

对中性点绝缘、消弧线圈接地系统,有

$$E = \frac{U_n}{2l_i + l_m} \quad \dots\dots\dots (C22)$$

式中:  $l_i$ ——绝缘子串的放电距离, m;

$l_m$ ——木横担线路的线间距离,对铁横担和钢筋混凝土横担线路,  $l_m = 0$ 。

如  $E \leq 6$  kV(有效值)/m,建弧率接近于 0。

## C10 有避雷线线路的雷击跳闸率的确定

在下列情况下,线路将要跳闸:

- a) 雷击杆塔顶部发生闪络并建立电弧;
- b) 雷绕过避雷线击于导线发生闪络并建立电弧。

运行经验证明,雷击避雷线的档距中间且与导线发生闪络引起跳闸的情况是极罕见的,可不予考虑。

雷绕击导线时,耐雷水平  $I_2$  可由下式求出:

$$I_2 = \frac{u_{50\%}}{100} \quad \dots\dots\dots (C23)$$

有避雷线线路的跳闸率可按下式计算:

$$N = N_L \eta (gP_1 + P_a P_2) \quad \dots\dots\dots (C24)$$

式中： $N$ ——跳闸率，次/(100 km·a)；  
 $\eta$ ——建弧率；  
 $g$ ——击杆率；  
 $P_1$ ——超过雷击杆塔顶部时耐雷水平的雷电流概率；  
 $P_2$ ——超过雷绕击导线时耐雷水平的雷电流概率；  
 $P_c$ ——绕击率(包括平原和山区)。

击杆率  $g$  与避雷线根数和地形有关，一般可采用表 C4 所列数据。

表 C4 击杆率

避雷线根数	1	2
平原	1/4	1/6
山丘	1/3	1/4

C11 送电线路耐雷水平和跳闸率的计算

a) 110 kV 单避雷线线路(图 C5)。

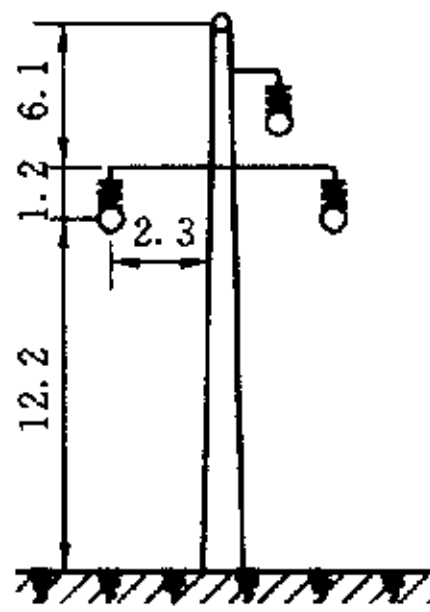


图 C5 110 kV 钢筋混凝土单杆

1) 避雷线平均高度：

$$h_g = 19.5 - \frac{2}{3} \times 2.8 = 17.6(\text{m})$$

2) 下导线平均高度：

$$h_c = 12.2 - \frac{2}{3} \times 5.3 = 8.66(\text{m})$$

3) 避雷线对下导线的几何耦合系数：

$$k_0 = \frac{\ln \frac{\sqrt{26.26^2 + 2.5^2}}{\sqrt{8.94^2 + 2.5^2}}}{\ln \frac{2 \times 17.6}{\frac{3.90}{1\,000}}} = 0.114$$

4) 电晕下的耦合系数：

$$k = k_1 k_0 = 1.25 \times 0.114 = 0.143$$

5) 杆塔电感：

$$L_t = 19.5 \times 0.84 = 16.4(\mu\text{H})$$

6) 雷击杆塔时的分流系数：

$$\beta = 0.90$$

7) 雷击杆塔时耐雷水平(当用 7×XP—70 以及  $R_i=7\,\Omega$  时)：

$$I_1 = \frac{700}{(1 - 0.143) \times 0.90 \times 7 + \left(\frac{13.4}{19.5} - 0.143\right) \times 0.9 \times \frac{16.4}{2.6} + \left(1 - \frac{17.6}{8.66} \times 0.114\right) \times \frac{8.66}{2.6}}$$
  
$$= 63.4(\text{kA})$$



$$k = k_1 k_0 = 1.25 \times 0.237 = 0.296$$

5) 杆塔电感:

$$L_t = 29.1 \times 0.5 = 14.6(\mu\text{H})$$

6) 雷击杆塔时分流系数:

$$\beta = 0.88$$

7) 雷击杆塔时耐雷水平(当用  $13 \times \text{XP}-70$  及  $R_t = 7 \Omega$  时):

$$I_1 = \frac{1200}{(1 - 0.296) \times 0.88 \times 7 + \left( \frac{25.6}{29.1} - 0.296 \right) \times 0.88 \times \frac{14.5}{2.6} + \left( 1 - \frac{24.5}{15.4} \times 0.237 \right) \times \frac{15.4}{2.6}}$$

$$= 110.2(\text{kA})$$

8) 雷电流超过  $I_1$  的概率:

$$P_1 = 5.6\%$$

9) 绕击率(当  $\alpha = 16.5^\circ$  时):

平原地区:  $P_a = 0.144\%$

山丘地区:  $P_a = 0.5\%$

10) 雷绕击于导线时的耐雷水平:

$$I_2 = \frac{1200}{100} = 12(\text{kA})$$

11) 雷电流超过  $I_2$  的概率:

$$P_2 = 73.1\%$$

12) 建弧率:

$$\eta = 0.80$$

13) 跳闸率:

平原地区:

$$N = 0.28 \times (11.6 + 4 \times 24.5) \times 0.80 \times \left( \frac{1}{6} \times 0.056 + \frac{0.144}{100} \times \frac{73.1}{100} \right)$$

$$= 0.25$$

山丘地区:

$$N = 0.28 \times (11.6 + 4 \times 24.5) \times 0.80 \times \left( \frac{1}{4} \times 0.056 + \frac{0.5}{100} \times \frac{73.1}{100} \right)$$

$$= 0.43$$

c) 500 kV 双避雷线线路(图 C7)。

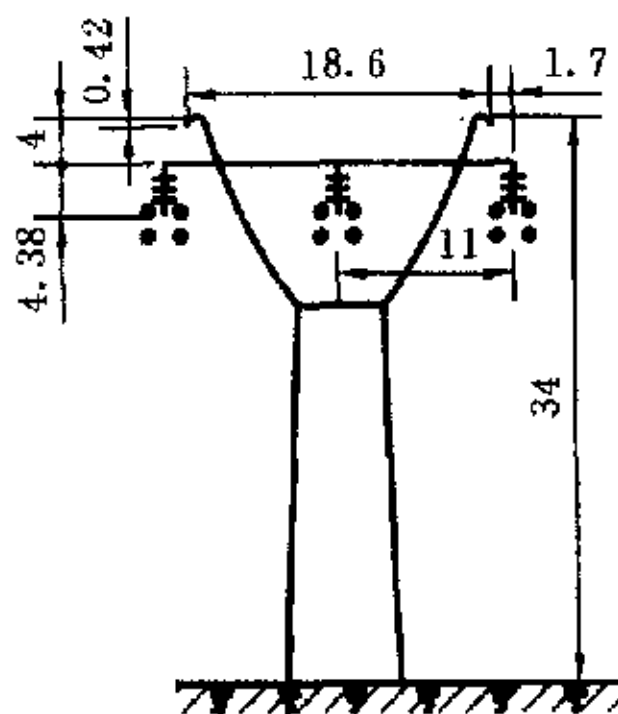


图 C7 500 kV 酒杯型铁塔

1) 避雷线平均高度:



$$h_g = 33.58 - \frac{2}{3} \times 9.5 = 27.25(\text{m})$$

2) 导线平均高度:

$$h_v = 25.62 - \frac{2}{3} \times 12 = 17.62(\text{m})$$

3) 双避雷线对外侧导线的几何耦合系数:

$$k_0 = \frac{\ln \frac{\sqrt{44.87^2 + 1.7^2}}{\sqrt{9.63^2 + 1.7^2}} + \ln \frac{\sqrt{44.87^2 + 20.3^2}}{\sqrt{9.63^2 + 20.3^2}}}{\ln \frac{2 \times 27.25}{\frac{5.5}{1000}} + \ln \frac{\sqrt{54.5^2 + 18.6^2}}{18.6}} = 0.223$$

4) 电晕下的耦合系数:

$$k_1 = k k_0 = 1.28 \times 0.223 = 0.285$$

5) 杆塔电感:

$$L_t = 34 \times 0.5 = 17(\mu\text{H})$$

6) 雷击杆塔时的分流系数:

当  $R_i = 7 \Omega$  时,  $\beta = 0.865$ ;

当  $R_i = 15 \Omega$  时,  $\beta = 0.822$ 。

7) 雷击杆塔时的耐雷水平(25×XP2, 当  $R_i = 7 \Omega$  时):

$$I_1 = \frac{2138}{(1 - 0.285) \times 0.865 \times 7 + \left( \frac{30}{34} - 0.285 \right) \times 0.865 \times \frac{17}{2.6} + \left( 1 - \frac{27.75}{17.62} \times 0.223 \right) \times \frac{17.62}{2.6}} \\ = 176.6(\text{kA})$$

8) 雷电流超过  $I_1$  的概率:

当  $R_i = 7 \Omega$  时,  $P_1 = 0.98\%$ ;

当  $R_i = 15 \Omega$  时,  $P_1 = 3.8\%$ 。

9) 绕击率(当  $\alpha = 14^\circ$  时):

平原地区  $P_\alpha = 0.112\%$

山丘地区  $P_\alpha = 0.397\%$

10) 雷绕击导线时的耐雷水平:

$$I_2 = \frac{2138}{100} = 21.4(\text{kA})$$

11) 雷电流超过  $I_2$  的概率:

$$P_2 = 57.1\%$$

12) 建弧率:

$$\eta = 1.0$$

13) 跳闸率:

平原地区:

$$N = 0.28 \times (18.6 + 4 \times 27.25) \times 1.0 \times \left( \frac{1}{6} \times 0.0098 + \frac{0.112}{100} \times \frac{57.1}{100} \right) \\ = 0.081$$

山丘地区:

当  $R_i = 7 \Omega$  时,



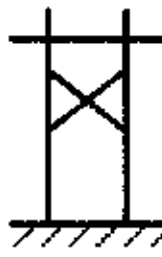
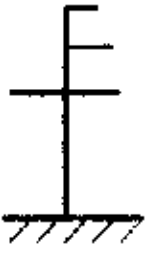
$$N = 0.28 \times (18.6 + 4 \times 27.25) \times 1.0 \times \left( \frac{1}{4} \times 0.0098 + \frac{0.397}{100} \times \frac{57.1}{100} \right) \\ = 0.17$$

当  $R_i=15\ \Omega$  时,

$$N=0.28\times(18.6+4\times27.25)\times1.0\times\left(\frac{1}{4}\times0.038+\frac{0.397}{100}\times\frac{57.1}{100}\right)$$
$$=0.42$$

C12 110 kV~500 kV 架空送电线路典型杆塔的耐雷水平和雷击跳闸率(表 C5)

表 C5 110 kV~500 kV 架空送电线路典型杆塔的耐雷水平和雷击跳闸率

标称电压,kV		500	330	220	110
杆塔型式					
保护角		14°	20°	16.5°	25°
保护方法		双避雷线	双避雷线	双避雷线	单避雷线
杆塔绝缘	绝缘子个数	25×XP2-160	19×XP1-100	13×X—70	7×X—70
	50%冲击放电电压(正极性) kV	2 138	1 645	1 200	700
档距长度,m		400	400	400	300
冲击接地电阻,Ω		7~15	7~15	7~15	7~15
雷击杆塔时耐雷水平 kA		177~125	155~105	110~76	63~41
建弧率		100%	100%	91.8%	85%
平原线路	绕击率	0.112%	0.238%	0.144%	0.238%
	击杆率	1/6	1/6	1/6	1/4
	跳闸率	0.081	0.12	0.25	0.83
山区线路	绕击率	0.40%	0.84%	0.5%	0.82%
	击杆率	1/4	1/4	1/4	1/3
	跳闸率	0.17~0.42	0.27~0.60	0.43~0.95	1.18~2.01
注:跳闸率栏,平原对应 $R_i=7\ \Omega$ ,山区两数据分别对应 $R_i$ 为 $7\ \Omega$ 和 $15\ \Omega$ 。					

C13 大档距导线与避雷线间距离的确定

线路档距中央导线与避雷线间的距离按雷击档距中央避雷线时不致击穿导线与避雷线间的间隙来确定。对于不很长的档距,在雷电流未达到最大值之前,从杆塔接地装置反射回来的负波已达到雷击点,因而限制了雷击点的电位升高。在这种情况下,导线与避雷线间的距离按式(14)计算。对于较大的档距,在档距  $l>v'\tau$  m 时( $v'$ ——波的传播相速,取  $225\text{ m}/\mu\text{s}$ ;  $\tau$ ——波头长度),来自杆塔的负波,在雷电流达到最大值之前尚未达到雷击点,此时,雷击点的电压最大值为:

$$U=\frac{I}{2}\times\frac{Z}{2}=\frac{I\times350}{4}\approx90I\quad\cdots\cdots\cdots(\text{C25})$$

式中:  $U$ ——雷击点的电压最大值,kV;  
 $I$ ——耐雷水平,kA。

取导线与避雷线间空气间隙的平均击穿强度为  $700\text{ kV}/\text{m}$ ,有电晕时的耦合系数  $k_1k_0=0.2$ ,则导线

与避雷线间的距离可按下式计算：

$$S_2 = \frac{90I \times (1 - 0.2)}{700} \approx 0.1I \dots\dots\dots (C26)$$

附 录 D

(提示的附录)

外绝缘放电电压的气象条件校正

D1 外绝缘放电电压试验数据通常以标准气象条件给出。标准气象条件是：

- 气压 101.325 kPa；
- 温度 20℃；
- 绝对湿度 11 g/m³。

注：1 mmHg=133.322 Pa,760 mmHg=101.325 kPa。

D2 外绝缘所在地区气象条件异于标准气象条件时，放电电压可按下式校正：

$$u = \frac{\delta^n u_0}{H^n} \dots\dots\dots (D1)$$

- 式中：u<sub>0</sub>——标准气象条件下绝缘放电电压,kV；  
u——实际放电电压,kV；  
δ——相对空气密度,标准气象条件下为1,不同海拔时可按表D1(或实测数据)决定；  
H——空气湿度校正系数,由式(D2)、式(D3)决定；  
n——指数,与绝缘长度有关,由式(D4)决定。

表 D1 不同海拔高度的气象参数

海拔高度,m	0	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
相对气压	1	0.945	0.888	0.835	0.786	0.741	0.695	0.655
相对空气密度 δ	1	0.955	0.908 5	0.865	0.824	0.784	0.745	0.708
空气绝对湿度 h,g/m³	11	9.17	7.64	6.37	5.33	4.42	3.68	3.08

D2.1 空气湿度校正系数 H

a) 工频交流电压

$$H = 1 + 0.012\,5(11 - h) \dots\dots\dots (D2)$$

式中：h——空气绝对湿度,g/m³,不同海拔高度时可按表D1(或实测数据)决定(本式中 3≤h≤11)。

b) 雷电及操作冲击电压波

$$H = 1 + 0.009(11 - h) \dots\dots\dots (D3)$$

D2.2 指数 n

a) 工频交流电压、正极性操作冲击电压波

$$n = 1.12 - 0.12l_i \dots\dots\dots (D4)$$

式中：l<sub>i</sub>——绝缘的长度(对绝缘子即串的净长,对空气间隙即间距),m。

式(D4)适用于 1≤l<sub>i</sub>≤6。对于另外的 l<sub>i</sub>,取 n=1。

b) 正极性雷电冲击电压波

$$n = 1$$

## 附录 E

(提示的附录)

## 计算操作过电压下线路绝缘闪络率的近似统计法

## E1 近似统计法

单个绝缘在幅值为  $u$  的操作过电压作用下发生闪络的概率  $P(u)$  为:

$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma_i^2} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(u-\bar{u}_i)^2}{2\sigma_i^2}} du \quad \dots\dots\dots (E1)$$

式中:  $\bar{u}_i$ ——单个绝缘在操作冲击电压波下的 50% 放电电压;

$\sigma_i$ ——单个绝缘放电电压的标准偏差。

如线路上操作过电压服从正态分布, 且其均值及标准偏差分别为  $\bar{u}_0$  及  $\sigma_0$ , 那么在一次操作中幅值为  $u$  与  $u+du$  间的过电压出现的概率为:

$$F(u)du = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma_0} e^{-\frac{(u-\bar{u}_0)^2}{2\sigma_0^2}} du \quad \dots\dots\dots (E2)$$

于是受到操作过电压分布整体作用的单个绝缘闪络概率  $P_s$  为:

$$P_s = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} F(u) p(u) du \quad \dots\dots\dots (E3)$$

式中的 1/2 为忽略负极性操作过电压的闪络引入。

$$P_s = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda'} e^{-\frac{1}{2}u^2} du \right) \quad \dots\dots\dots (E4)$$

式(E4)括号内为正态概率积分函数, 可由数表查出, 其中标准变量  $\lambda'$  为:

$$\lambda' = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_i}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_i^2}} \quad \dots\dots\dots (E5)$$

如令  $K$  为操作过电压统计配合系数, 且:

$$K = \frac{\bar{u}_i}{U_0} \quad \dots\dots\dots (E6)$$

式中:  $U_0 = \bar{u}_0 \left( 1 + 2.05 \frac{\sigma_0}{\bar{u}_0} \right)$ , 为统计操作过电压。

那么  $\lambda'$  也可由下式算得:

$$\lambda' = \frac{1 - K \left( 1 + 2.05 \frac{\sigma_0}{\bar{u}_0} \right)}{\sqrt{\left( \frac{\sigma_0}{\bar{u}_0} \right)^2 + \left[ K \left( 1 + 2.05 \frac{\sigma_0}{\bar{u}_0} \right) \times \frac{\sigma_i}{\bar{u}_i} \right]^2}} \quad \dots\dots\dots (E7)$$

受到同一操作过电压作用的  $N$  个绝缘的闪络概率  $P'_z$  为:

$$P'_z \approx 1 - (1 - P_s)^N \quad \dots\dots\dots (E8)$$

## E2 计算例

500 kV 线路全长 300 km, 档距长度 400 m, 海拔高度 1 000 m。线路上最高的统计操作过电压为 2.0 p.u.。假定全线过电压相同, 服从正态分布, 标准偏差  $\sigma_0 = 0.12 \bar{u}_0$ 。

只计算绝缘子串闪络, 由于塔窗中相绝缘子串正极性操作冲击电压波的放电电压比边相低 10%, 故仅计算中相, 于是绝缘子串总数  $Z = 750$ 。  $\sigma_i = 0.05 \bar{u}_i$ 。

计算过程及结果示于表 E1。



表 E1 500 kV 线路绝缘子串在操作过电压下的闪络率(闪络次数/100 次操作)计算

操作过电压	统计过电压 $U_0$ , kV	900	
	倍数 $(1.0 \text{ p. u.} = \sqrt{2} U_n / \sqrt{3})$	2.0	
	变异系数 $\frac{\sigma_0}{u_0}$	0.12	
绝缘子	高度, mm	155	155
	几何爬电距离, mm	290	360
	片数	28	25
	50%放电电压 $\bar{u}_t$ , kV	1 520	1 390
	放电电压变异系数 $\frac{\sigma_t}{u_t}$	0.05	0.05
统计配合系数	$K = \frac{\bar{u}_t}{U_0}$	1.689	1.544
	$K' = \frac{0.95\delta^* \bar{u}_t}{U_0}$	1 515	1.379
标准化变量 $\lambda'$ [式(E7)]		-5.814	-4.87
单个绝缘闪络概率 $P_s$		$\approx 0$	$2.1 \times 10^{-7}$
多个绝缘闪络概率 $P'_s$		$\approx 0$	$2.1 \times 10^{-4}$
操作过电压闪络率(闪络次数/100 次操作)		$\approx 0$	0.021

E3 当过电压为其他分布或需计算包括空气间隙在内的线路操作过电压闪络率时,可另行研究确定。

附 录 F

(提示的附录)

部分超高压绝缘子串、空气间隙绝缘强度的  
仿真型塔(构架)试验数据

F1 说明

- a) 所列数据均为由仿真型塔(构架)试验获得,并换算至标准气象条件。
- b) 用于试验的操作冲击电压波波形均为  $250 \times 2\,500\ \mu\text{s}$ ,正极性。
- c) 用于试验的雷电冲击电压波波形为  $1.5 \times 40\ \mu\text{s}$ ,正极性。
- d) 除特别注明外,试验均是在户外进行的。

F2 杆塔上绝缘子串及空气间隙的放电电压

- a) 绝缘子串的放电电压见表 F1。
- b) 空气间隙的放电电压见表 F2。

F3 500 kV 变电所仿真型构架(或设备)在操作冲击电压波下空气间隙的放电电压

F3.1 二分裂软导线( $\phi 51\text{ mm}$  间距  $400\text{ mm}$ )

变电所门型构架模型:由两根直径  $\phi 426\text{ mm}$  的半圆柱体组成的人字柱,横梁宽  $1.8\text{ m}$ ,长  $13\text{ m} \sim 18\text{ m}$ ,对地高度为  $16.5\text{ m}$ 。

导线对构架空气间隙 50%放电电压的数据见表 F3。

$$\sigma_i / u_{50\%} = 4.5\% \sim 6\%$$

表 F1 杆塔上绝缘子串在冲击电压波下的放电电压

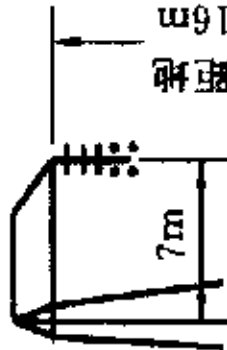
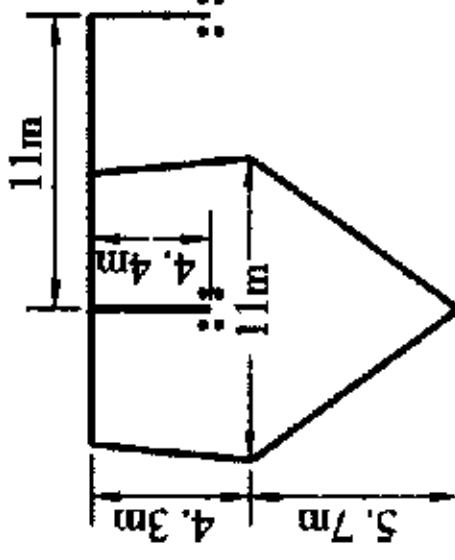
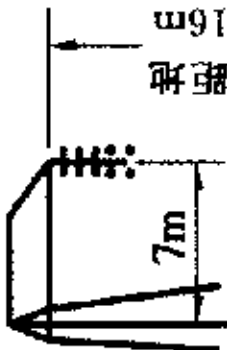
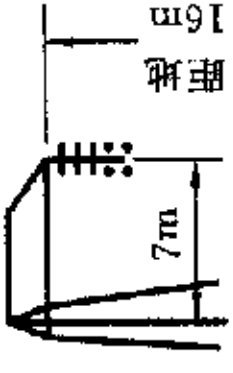
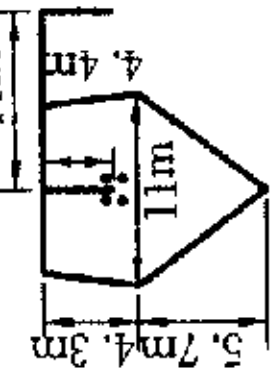
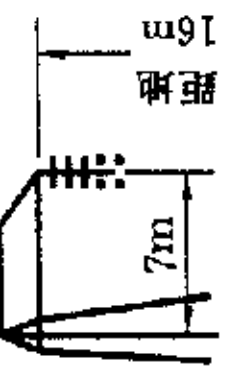
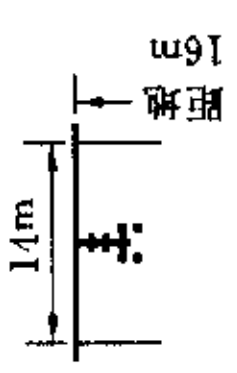


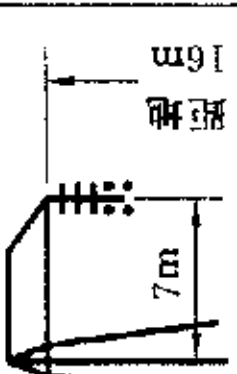
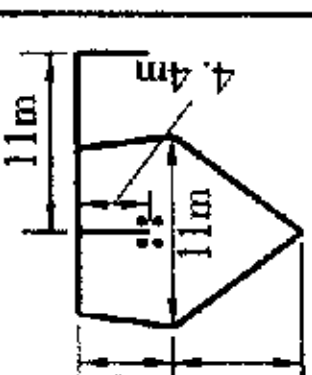
电压种类		操作冲击						雷电冲击											
每串片数		湿						干			数据 1			数据 2			数据 3		
								数据 1											
		$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %	$u_{50\%}$ kV	$\sigma_1/u_{50\%}$ %		
24	1 443	4.8	1 523	2.3	1 457	8.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
25	—	—	—	—	—	10.5	中相 1 393 边相 1 547	4.1 4.7	边相 2 138	6.3	—	—	—	—	—	—	—		
26	1 532	2.6	1 618	7.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
28	1 604	7.0	1 681	3.1	1 681	3.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
30	1 690	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
塔头形状																			
绝缘子		高度 155 mm						高度 155 mm						高度 155 mm					
来源		注 1						注 2						注 3					
注		1 保定变压器厂、清华大学高压教研组、北京电力设计院、北京电力试验研究所:500 kV 晋京线输电杆塔绝缘电气特性试验报告,《北京电力技术》,1979.1。 2 电力科学研究院:第二代 500 kV 输电线路杆塔头的绝缘试验,1983.4。 3 电力科学研究院:500 kV 输电线路塔头绝缘的试验研究,《电网技术》,1982.1。																	

表 F2 杆塔上空气间隙的放电电压

电压种类	工频交流		操作冲击				雷电冲击		
数据	数据 1	数据 2	数据 1	数据 2	数据 3	数据 4	数据 1	数据 2	数据 3
$u_{50\%}$ kV	图 F1	443L+80 (1.0 m<L <2.5 m)	图 F2 曲线 1、2	图 F2 曲线 1、2	图 F3 曲线 2、3	图 F3 曲线 4	531.25L+31 (2.5 m<L <5.5 m)	555L (3.0 m<L <4.5 m)	图 F2 曲线 3
$\sigma_s/u_{50\%}$ %	2	0.5~1.3	2.75~5.4	3.0~5.4	中相 3.58~4.98 边相 5.0~5.13	3.0~4.77	—	1.22~1.76	—
塔头形状	—								
来源	注 3	注 1	注 2	注 1	注 4	注 4	注 5	注 1	注 2
<p>注</p> <p>1 同表 F1 注 1。</p> <p>2 同表 F1 注 2。</p> <p>3 J. G. 安德生等：345 kV 及以上超高压输电线路，电力工业出版社，1981 年 6 月。</p> <p>4 保定变压器厂、北京电力试验研究所：500 kV 输电杆塔中相绝缘操作波试验，《北京电力技术》，1979. 10。</p> <p>5 日本 500 kV 输电线路绝缘的实尺寸试验，《IEEE》PAS—88, No. 2, 1969。</p>									

F3.2 电气设备

隔离开关对构架及车辆空气间隙的 50%放电电压数据见表 F4 及表 F5。

$\delta_t/u_{50\%} = 4.5\% \sim 6\%$

车辆模型的尺寸:长×宽×高为 10.8 m×2.5 m×3.5 m。

F3.3 悬吊式硬导线

硬导线为 φ150(内 φ136)mm 铝管。变电所构架为由 φ426 mm 半圆柱两根组成的人字柱。横梁对地高 20 m。导线悬挂方式见图 F4。不同的双 V 型绝缘子串布置方式下无均压环的 50%放电电压数据见表 F6。有均压环时,对于间隙距离为 3.0 m~4.2 m 的情况,间隙距离需增加 5.5%。

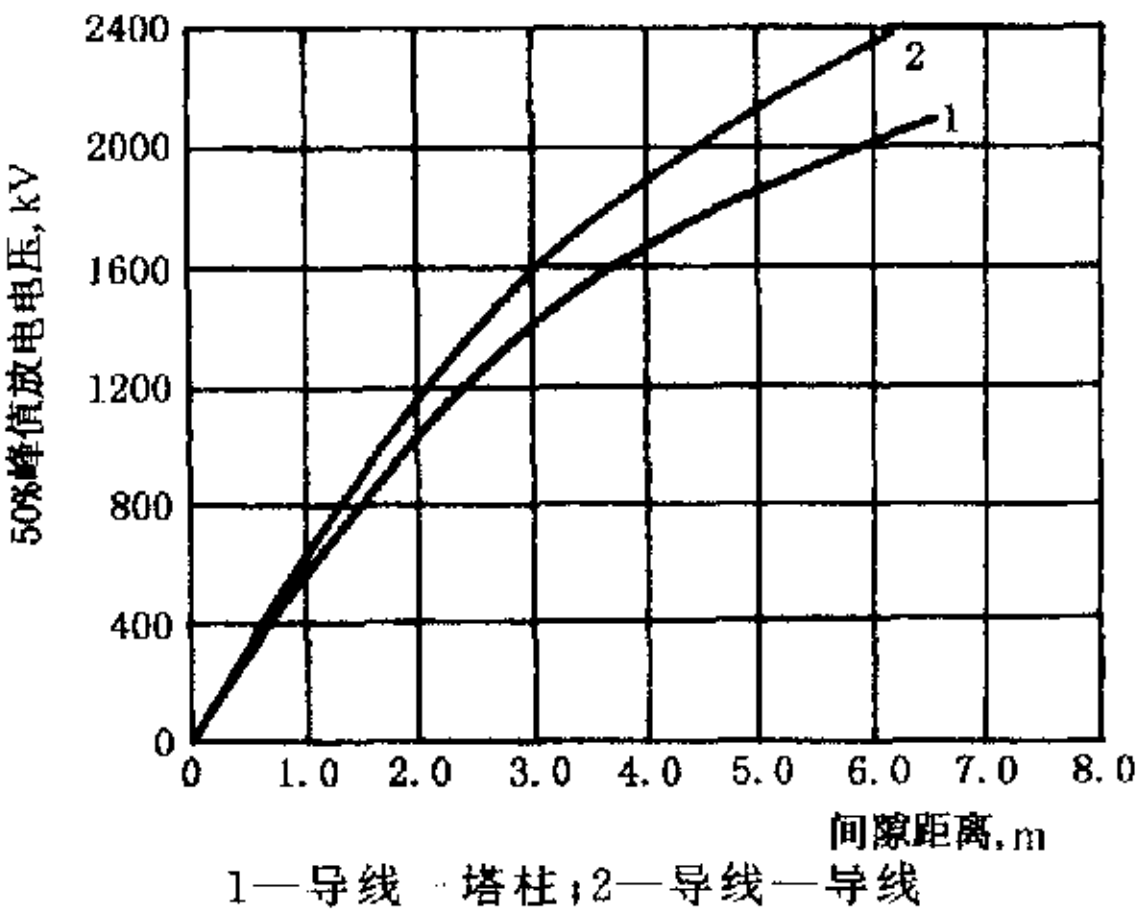


图 F1 空气间隙在工频交流电压下的 50%放电电压

表 F3 导线对构架空气间隙在操作冲击电压波下的 50%放电电压(二分裂软导线)

高压电极	有无均压环	对接地电极距离 m		绝缘子悬挂方式及片数	$u_{50\%}$ kV
		对横梁	对人字柱 <i>l</i>		
导线	无	3.8	2.55~6.55**	耐张串 32×XP1-160	846 <i>l</i> <sup>0.33</sup>
导线	无	4.2	2.55~6.55**	耐张串 32×XP1-160	820 <i>l</i> <sup>0.36</sup>
导线	无	4.2	4.2~6.2*	耐张串 32×XP1-160	1 195 <i>l</i> <sup>0.16</sup>
导线	无	4.2	5.2~3.2*	跳线风偏	698 <i>l</i> <sup>0.61</sup>
导线	无	4.2	5.05~3.65**	跳线风偏	573 <i>l</i> <sup>0.61</sup>
导线	有	4.06	3.2~6.2**	V 串 32×XP-70	844 <i>l</i> <sup>0.29</sup>
导线	有	3.94	2.7~6.2**	V 串 34×XP-70	785 <i>l</i> <sup>0.34</sup>
* 导线与人字柱侧面间隙。 ** 导线与人字柱正面间隙。					

表 F4 隔离开关对构架空气间隙在操作冲击电压波下的 50%放电电压

高压电极	隔离开关状态	对接地电极(人字柱)距离 <i>l</i> m	$u_{50\%}$ kV
GW6 动触头	合	4.9~6.75**	767 <i>l</i> <sup>0.4</sup>
GW6 动触头	分	5.1~6.75**	723 <i>l</i> <sup>0.41</sup>
GW7 静触头	合	2.1~5.1*	600 <i>l</i> <sup>0.53</sup>
GW7 静触头	分	2.7~4.1*	559 <i>l</i> <sup>0.7</sup>
* GW7 中心线对人字柱中心线距离为 6.0 m。 ** 无人检修状态。			



表 F5 隔离开关对车辆空气间隙在操作冲击电压波下的 50%放电电压

高压电极	隔离开关状态	对车辆距离 m		$U_{50\%}$ kV
		对车尾	对侧边 $l$	
GW6 动触头	合	4.2	4.99~5.67	$891l^{0.32}$

注：数据来源自电力科学研究院：A 值的试验研究（阶段报告），1982 年 8 月。表 F3、表 F4 同此。

表 F6 导线对构架空气间隙在操作冲击电压波下的 50%放电电压（悬吊式硬导线）

高压电极	对接地电极距离 m		绝缘子片数	$U_{50\%}$ kV
	对横梁 Y	对人字柱 $l$		
导线	3.82	2.7~6.35	35×XP-100	$632l^{0.51}$
导线	4.3	2.7~6.35	35×XP-100	$705l^{0.46}$
导线	4.56	2.7~6.35	35×XP-100	$687l^{0.46}$
导线	4.86	2.7~6.35	35×XP-100	$754l^{0.43}$
导线	5.8	2.7~8.85	42×XP-100	$804l^{0.42}$

注：数据来源自电力科学研究院：悬吊式铝管母线操作冲击放电特性（阶段报告），1981 年。

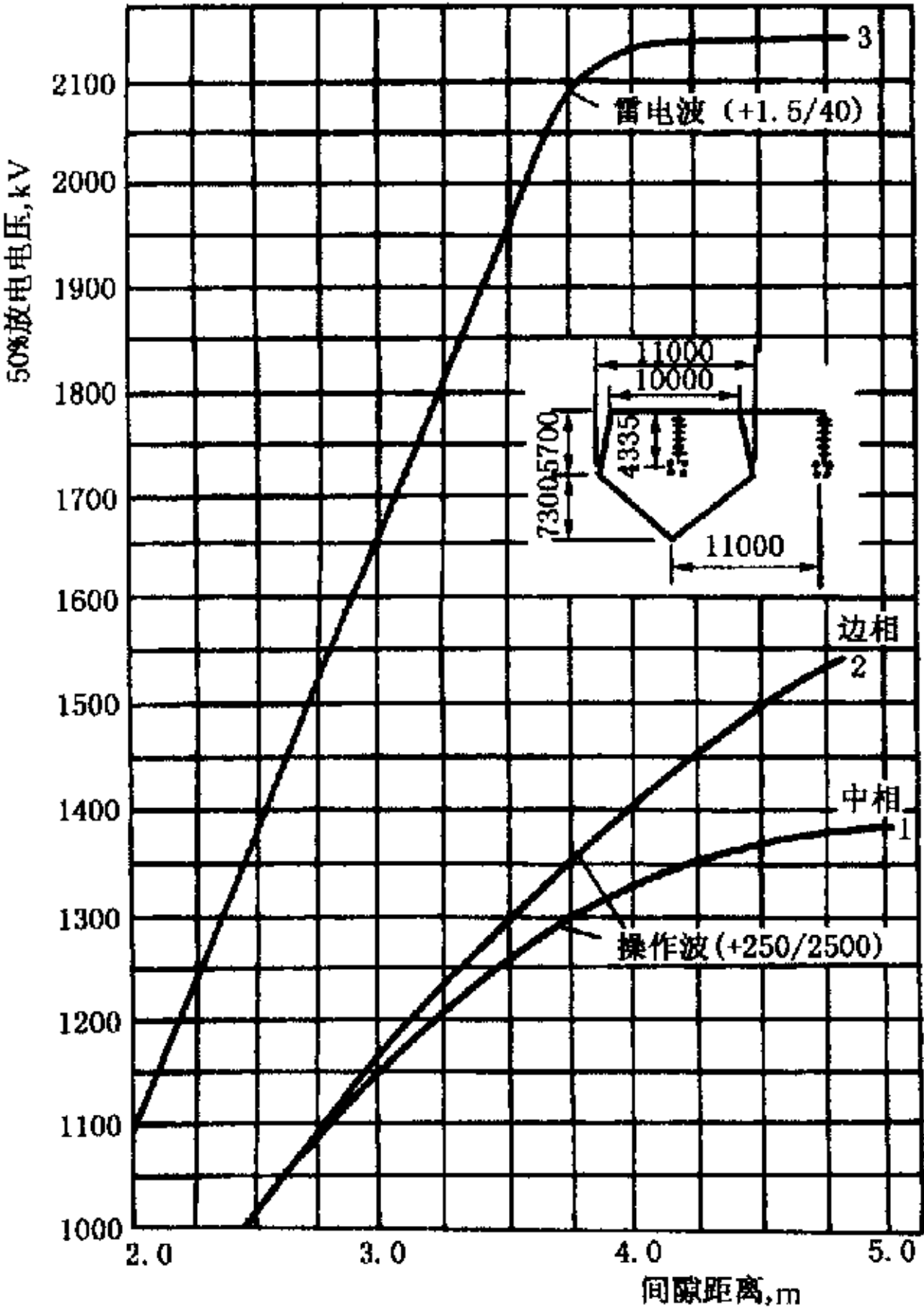


图 F2 500 kV 线路酒杯塔(ZB3 型)塔头空气间隙在操作、雷电冲击波下的 50%放电电压

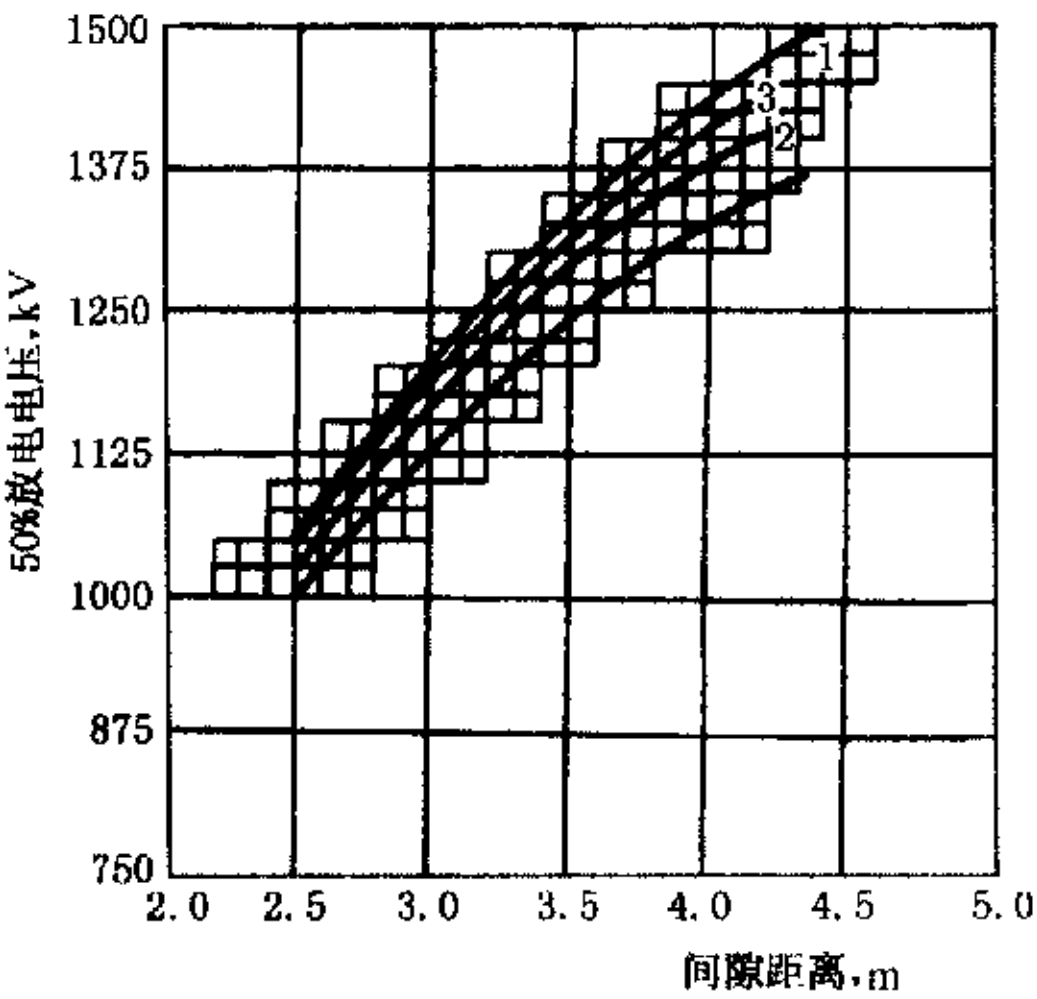
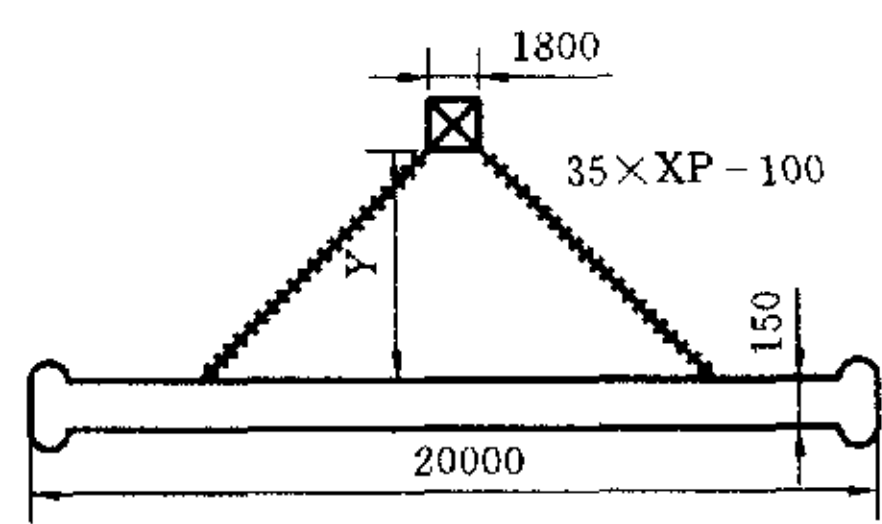
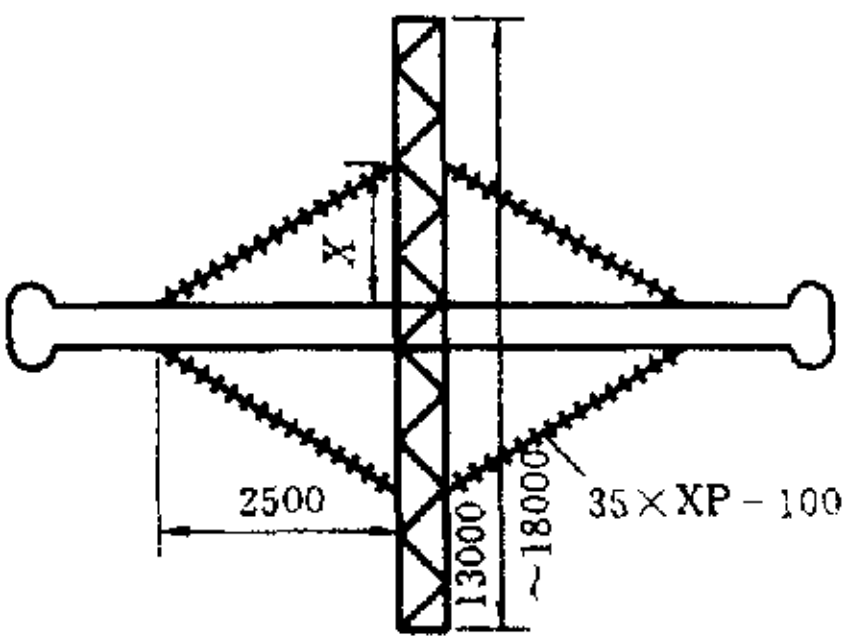


图 F3 500 kV 门型塔、酒杯塔等塔头空气间隙在操作冲击波下的 50%放电电压

1—边相导线—塔柱；2—门型塔中相；  
3—门型塔边相；4 塔窗口相



(a) 单 V 型串悬吊方式



(b) 双 V 型串悬吊方式

图 F4 悬吊式硬导线的布置