

# 变电工程设计电气专业主设人工作手册 专题报告

## 变电站过电压及绝缘配合

中国电力工程顾问集团

华北电力设计院工程有限公司变电电气室

2011 年 12 月

## 目录

1	系统接地方式和运行中出现的各种电压 .....	1
1.1	系统接地方式 .....	1
1.2	系统运行中出现于设备绝缘上的电压 .....	1
2	内部过电压 .....	2
2.1	暂时过电压的特点及相应的限制和保护设计 .....	3
2.2	操作过电压的特点及相应的限制和保护设计 .....	10
3	变电站雷电过电压保护 .....	15
3.1	变电站防直击雷保护 .....	16
3.2	变电站雷电侵入波过电压保护 .....	16
4	变电站绝缘配合原则 .....	17
4.1	绝缘配合的目的 .....	17
4.2	绝缘配合的一般原则 .....	17
4.3	绝缘配合的一般条件 .....	17
5	绝缘配合方法 .....	19
5.1	绝缘配合的方法 .....	20
5.2	绝缘配合方法的选择 .....	20
5.3	绝缘配合程序 .....	20
6	电气设备的绝缘配合 .....	22
6.1	电气设备绝缘配合的特点 .....	22
6.2	持续工频电压和暂时过电压的绝缘配合 .....	23
6.3	操作过电压下的绝缘配 .....	24

6.4	雷电过电压下的绝缘配合 .....	25
6.5	电气设备耐受电压的选择 .....	26
6.6	电气设备绝缘水平 .....	28

# 1 系统接地方式和运行中出现的各种电压

## 1.1 系统接地方式

选择系统中性点接地方式是一个综合性问题，它与电压等级、单相接地短路电流、过电压水平、保护配置有关，直接影响电网的绝缘水平。接地方式主要分为中性点直接接地和中性点非直接接地两种方式。中性点直接接地方式的单相短路电流较大，线路或设备需立即切除，增加了断路器的负担，降低供电连续性，但由于过电压较低，绝缘水平可下降，减少了设备造价，特别是在高压、超高压和特高压系统，经济效益显著，故适用于 110kV 及以上电网中。

中性点非直接接地分为以下四种形式：1) 中性点不接地，主要在 6~66kV 电网中；2) 中性点经消弧线圈接地；3) 中性点经高电阻接地，一般应用于大型发电机中性点；4) 中性点经低电阻接地。

## 1.2 系统运行中出现于设备绝缘上的电压

### 1.2.1 系统运行中出现于设备绝缘上的电压

- 1) 正常运行时的工频电压；
- 2) 暂时过电压(工频过电压、谐振过电压)；
- 3) 操作过电压；
- 4) 雷电过电压。

### 1.2.2 设备上按波形分类的作用电压

设备在运行中可能受到的作用电压，按照作用电压的幅值、波形及持续时间，可分为：

- 1) 持续工频电压(其值不超过设备最高电压，持续寿命时间等于设备设计的运行寿命)；
- 2) 暂时过电压(包括工频电压升高、谐振过电压)；
- 3) 缓波前(操作)过电压；
- 4) 快波前(雷电)过电压；
- 5) 陡波前过电压；
- 6) 联合过电压。

### 1.2.3 暂时过电压和操作过电压标么值的基准电压

- 1) 工频过电压的基准电压是  $U_m / \sqrt{3}$  (1.0p.u.);
- 2) 谐振过电压和操作过电压的基准电压是  $\sqrt{2}U_m / \sqrt{3}$  (1.0p.u.)。

### 1.2.4 系统最高电压的范围

- 1) 范围 I:  $3.6\text{kV} \leq U_m \leq 252\text{kV}$ ;
- 2) 范围 II:  $U_m < 252\text{kV}$ 。

## 2 内部过电压

内部过电压是指在电力系统中，由于断路器的操作、系统故障或系统的参数发生变化，导致电力系统内部能量的转化或传递的过渡过程中，而产生的过电压。系统参数变化的原因是多种多样的，因此内部过电压的幅值、振荡频率、持续时间不尽相同。内部过电压分为暂时过电压和操作过电压，操作过电压即电磁过渡过程中的过电压，一般持续时间在 0.1s 以内，暂时过电压包括谐振过电压和工频电压升高，持续时间相对较长，暂时过电压产生的原因主要是空载长线路的电容效应、不对称接地故障、负荷突变以及系统中可能发生的线性或非线性谐振等，下图表示了内部过电压的主要类型：

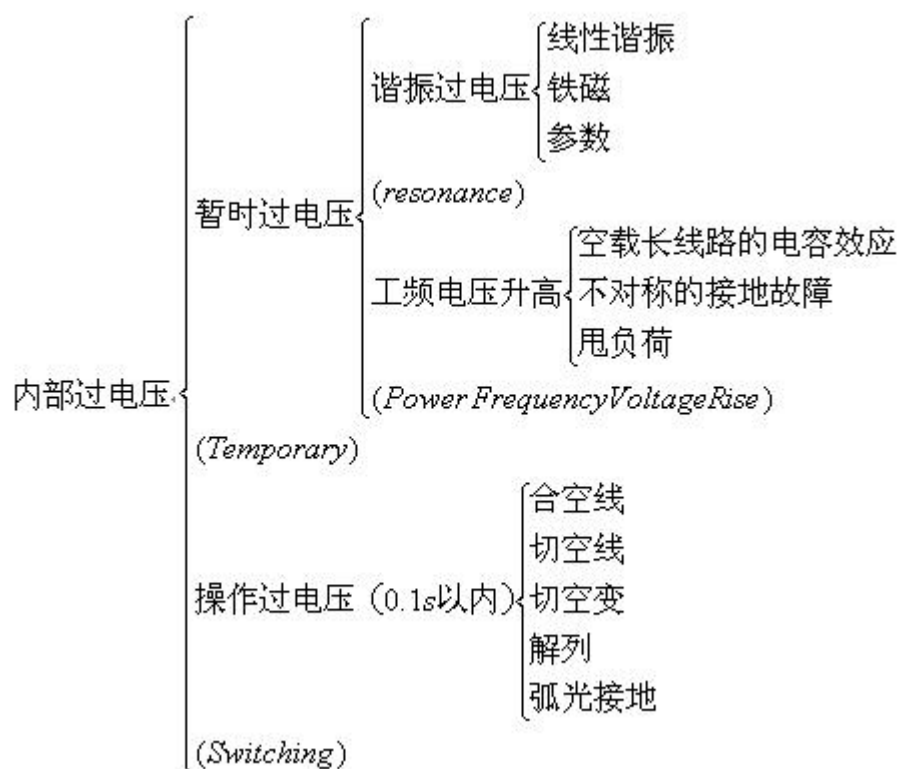


图 2-1 内部过电压主要类型

## 2.1 暂时过电压的特点及相应的限制和保护设计

### 2.1.1 暂时过电压的特点

#### 2.1.1.1 工频过电压的性质

工频过电压的频率为工频或接近工频，幅值不高，在中性点不接地或以消弧线圈接地的系统，约为工频电压的 $\sqrt{3}$ 倍；中性点直接接地系统中，在发电机暂态电势 $E'_d$ 为常数时，工频过电压处于暂态状态，持续时间不超过1s。由于在0.1~1s，以内，工频过电压仅变化2%~3%，一般多取0.1s左右的暂态数值作为参考值。此后，发电机自动电压调整器发生作用， $E'_d$ 变化，在2~3s以后，系统进入稳定状态，此时的工频过电压称为工频稳态过电压。

工频过电压的大小直接影响操作过电压的幅值，是决定避雷器额定电压的重要依据，持续时间长的工频电压升高仍可能危及设备的安全运行。理论分析和运行经验表明，工频过电压一般对220kV及以下电力网的电气设备没有危险，但对330kV及以上的超高压或特高压系统中，为降低电气设备绝缘水平，不但要对工频电压升高的数值予以限制，对持续时间也给予规定

#### 2.1.1.2 谐振过电压的性质

在系统进行操作或发生故障时，电感和电容性元件可能形成各种不同的振荡回路，在一定的能源作用下，产生谐振现象，引起谐振过电压，电力系统中的电感元件主要包括电力变压器、互感器、发电机、消弧线圈以及线路导线等元件，电容元件主要包括线路导线的对地电容和相间电容、补偿用的串联和并联电容器组以及各种高压设备的寄生电容等。

谐振过电压的持续时间较长，甚至可以稳定存在，直到破坏谐振条件为止。谐振过电压可在各级电网中发生，危及绝缘，烧毁设备，破坏保护设备的保护性能。

谐振过电压比操作过电压的持续时间长，性质上属于暂时过电压。谐振过电压的严重性既取决于它的幅值，也取决于它的持续时间。在不同电压等级、不同结构的系统中可以产生不同类型的谐振过电压，对应三种电感参数，在一定的电容参数和其他条件的配合下，可能产生三种不同性质的谐振现象，即：线性谐振、铁磁谐振和参数谐振。图2.1-1为谐振回路的原理图。

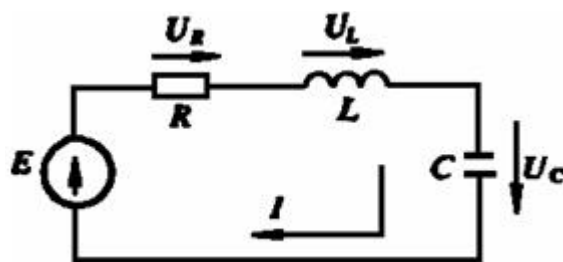


图 2.1-1 谐振回路原理图

在操作或故障引起谐振条件为： $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

其中稳态电压为：

$$\frac{U_C}{E} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + (2\mu\omega/\omega_0^2)^2}}$$

忽略回路电阻，并且  $\omega_0 \approx \omega$  则有：

$$U_C \approx U_L = \frac{E}{\left(1 + \frac{\omega}{\omega_0}\right) \left|1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right|} \approx \frac{E}{2\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}$$

由上式可以看出当  $\Delta\omega/\omega_0 = 10\%$  时，电容和电感上的电压可达电源电压的 5 倍。当  $\Delta\omega/\omega_0 = 20 \sim 25\%$  时，有 2 倍左右的过电压，离开以上范围电压很快下降

根据谐振趋势和电力系统运行经验，危险并非仅仅在谐振点，在接近谐振的参数范围内，都会引起严重的稳态过电压。

## 2.1.2 暂时过电压的限制和保护设计

2.1.2.1 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有重要影响。

(1) 系统中的工频过电压一般同线路空载、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 1.3p.u.

线路断路器的线路侧 1.4p.u.

并联电抗器是超高压和特高压系统中常见的补偿空载线路电容效应的措施，其原理如图 2.2-1.

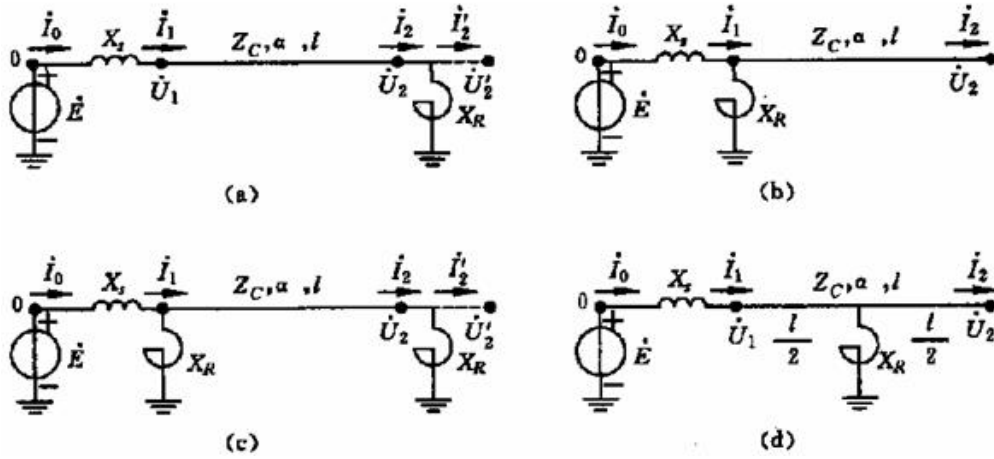


图 2.1-1 高压并联电抗器电气接线图

$$K_{02} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{E}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{X_s}{X_R}\right) \cos \alpha l + \left(\frac{Z_C}{X_R} - \frac{X_s}{Z_C}\right) \sin \alpha l}$$

其中

$$K_{02} = \frac{\cos \varphi \cos \theta}{\cos(\alpha l + \varphi - \theta)}$$

$$\varphi = \arctan \frac{X_s}{Z_c}$$

$$\theta = \arctan \frac{Z_c}{X_R}$$

图 2.1-2 表示了线路参数与高抗参数对沿线工频过电压的影响。



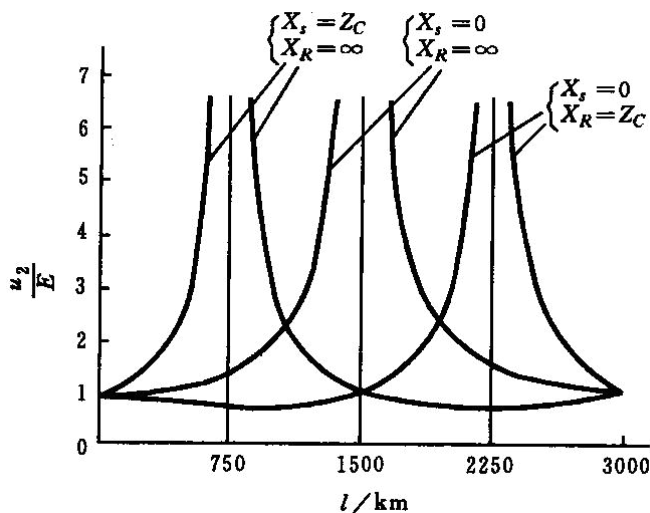


图 2.1-2 线路参数与高抗参数对沿线工频过电压的影响

线路末端接入并联电抗器，由于电抗器的感性无功功率部分地补偿了线路的容性无功功率，相当于减小了线路长度，因此降低了末端电压升高，由图 2.1-2 可以看出并联电抗器的接入可同时降低线路首端及末端的工频电压升。

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

应避免在 110kV 及 220kV 有效接地系统中偶然形成局部系统、低压侧有电源的 110kV 及 220kV 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。

(3) 空载线路末端工频过电压可按下式计算

$$U_g = \frac{E_d}{\cos \lambda - \frac{X_s}{Z} \sin \lambda}$$

$$\lambda = \omega l / v \text{ (对 } f = 50\text{Hz)}$$

式中  $U_g$  — 空载线路末端工频过电压，kV；

$E_d$  — 送端系统的等值电动势，kV；

$X_s$  — 送端系统的等值电抗， $\Omega$

$Z$  — 线路波阻抗， $\Omega$ ；

$\lambda$  — 线路波长，rad；

$v$  — 电波速度, Km/s;

$\tau$  — 输电线路长度, km。

突然失去负荷引起工频过电压可按下式计算:

$$E'd = U_m \sqrt{\left(1 + \frac{ptg\varphi}{S_f} X_{s*}\right)^2 + \left(\frac{P}{S_f} X_{s*}\right)^2}$$

式中  $E'd$  — 失去负荷前发电机等值暂态电动势, kV;

$U_m$  — 失去负荷前母线电压, kV;

$S_f$  — 发电机视在功率, KVA,

$P$  — 线路输送功率, KW;

$X_{s*}$  — 送端系统等值电抗标么值;

$\varphi$  — 功率因数角。

单相接地故障, 健全相工频过电压可按下式计算

$$U = \sqrt{3} \frac{\sqrt{1+k+k^2}}{2+k} U_x$$

式中  $U$  — 健全相工频过电压, kV;

$U_x$  — 故障相在故障前的相电压, kV;

$K$  — 系统零序电抗与正序电抗的比值。

2.1.2.2 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。

(1) 为防止发电机电感参数周期性变化起的发电机自励磁(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, 仅能及速动过电压继电保护切机以限制其作用时间。

(2) 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。

(3) 对 330kV 及以上系统，由于输电线路较长，容抗值较小，易发考自励磁过电压，常采用并联电抗器加以限制，并联电抗器限制自励磁过电压的最小容量可按下式计算。

$$Q > P_{\lambda} \operatorname{tg} \lambda - \frac{1}{\frac{X_0\%}{S_b} + \frac{X_d\%}{S_f}}$$

式中  $Q$  — 并联电抗器容量，kvar；

$P_{\lambda}$  — 线路自然功率，kW；

$S_b$  — 升压变压器容量，kVA；

$S_f$  — 发电机容量，kVA；

$X_0\%$  — 升压变压器漏抗标么值；

$X_d\%$  — 发电机直轴电抗标么值。

2.1.2.3 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心的磁饱和特性，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：

- (1) 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；
- (2) 限制潜供电流的要求；
- (3) 连接接地电抗器的并联电抗器中性点绝缘水平。

2.1.2.4 范围 II 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心磁饱和、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。

#### 2.1.2.5 范围 I 的系统中有可能出现下列谐振过电压

(1) 110kV 及 220kV 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。

(2) 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  $2.0 \sim 3.0p.u.$  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。

(3) 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 110kV 及 220kV 变压器的中性点绝缘，这时宜在中性点装设间隙。在操作过程中，应选将变压器中性点临时接地。

(4) 3~66kV 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)，因合闸充电或在运霆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，其例子电压互感器中性点尽可能不接地：

3) 个别情况下，在 10kV 有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  $X_{00}$  ( $X_{00}$  是系统每相的对地分布容抗)，使  $X_{00} < 0.1X_m$  ( $X_m$  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  $R_{\Delta} \leq 0.4(X_m/K_{13})$  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) 10kV 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 600W) 的电阻接地。

2.1.2.6 3~66kV 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：

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

2.1.2.7 装设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。

## 2.2 操作过电压的特点及相应的限制和保护设计

顾名思义，操作过电压主要发生在由于“操作”引起的过渡过程，系统的运行状况发生突然变化，导致系统内部电感元件和电容元件之间电磁能量的互相转换，而转换常常是强阻尼的、振荡性的过渡过程。电力系统的操作主要包括：1) 分、合闸空载线路，电容器；2) 分、合闸空载变压器、电抗器；3) 各类故障，例如接地故障、断线故障等。

操作过电压的主要类型主要包括：1) 空载线路分闸过电压（开断电容性负载，还包括电容器组等）；2) 空载线路合闸过电压（包括计划性、重合闸）；3) 空载变压器分闸过电压（开断电感性负载，还包括电抗器、高压电动机等）；4) 间歇电弧接地过电压；5) 解列过电压。

对于电压等级低一些的系统，操作过电压虽不是决定绝缘水平的因素，但常因间隙电弧过电压等引起事故。随着系统电压的提高，操作过电压的问题就突出出来，若不采取限压措施，将导致设备绝缘费用的迅速增加，因此 330kV 及以上超高压、特高压系统操作过电压及其限制措施的研究尤为重要。

### 2.2.1 操作过电压的特点

与工频电压升高和谐振过电压相比，操作过电压有以下特点：1) 过电压幅值高；2) 强阻尼、高振荡性；3) 持续时间短。

由于操作过电压的能量来源于系统本身，故其幅值与额定电压大致有一定倍数关系，通常以系统最高运行相电压的幅值  $U_{phm}$  作为基值来计算过电压倍数  $K_n$ ，即：

$$K_n = \frac{U_m}{U_{phm}}$$

操作过电压的幅值、持续时间与电网结构参数、断路器性能、系统接线、操作类型等因素有关，其中很多因素具有随机性，因此过电压幅值持续时间也具有统计性。

(1) 电网中的电容、电感等储能元件，在发生故障或操作时，由于其工作状态发生突变，将产生充电再充电或能量转换的过渡过程，电压的强制分量叠加以暂态分量形成操作过电压。其作用时间约在几毫秒到数十毫秒之间。倍数一般不超过 4 倍。

操作过电压的幅值和波形与电网的运行方式、故障类型、操作对象有关，再加上操作过程中其他多种随机因素的影响，使得对操作过电压的定量分析，大多依靠实测统计和模拟研究。

故障形成不同或操作对象不同，产生过电压的机理也不同。因而所采取的针对性限制措施也各异。

(2) 系统中的操作过电压一般由下列原因引起；

- 1) 间歇性电弧接地；
- 2) 空载线路分、合(重合)闸；
- 3) 空载变压器和并联电抗器分闸；
- 4) 线路非对称故障分闸和振荡解列等。

220kV 及以下系统中，由于绝缘水平较高，能承受可能出现的操作过电压，一般不采取限制措施。330kV 及以上系统中，应采用限制操作过电压的措施。

## 2.2.2 操作过电压的限制及保护设计

### 2.2.2.1 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，由于电源电动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。

(1) 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(如运行中使用时)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电高电压；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。

(2) 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)，在线路上产生的相对地统计过电压，对 330kV 和 500kV 系统分别不宜大于 2.2p.p.和 2.0p.u.。

(3) 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 2.1. 2.1 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 2.2-1。

表 2.2-1 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
				≥500	<200

2) 系统中变电所出线时的参考条件：

330kV <200km

500kV <200km

在其它条件下，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。

(4) 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。

#### 2.2.2.2 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。

(1) 对范围 II 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。

(2) 对范围 I，110kV 及 220kV 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 3.0 p.u.。为此，开断空载架空线路宜采用不重击穿得断路器；开断电缆线路应该瞎用不重击穿得断路器。

(3) 对范围 I，66kV 及以下系统中，开断空载线路断路器发生重击穿是的过电压一般不超过 3.5 p.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 4.0 p.u.。为此选用操作断路器时，应该是其开断空载线路过电压不超过 4.0 p.u.。

#### 2.2.2.3 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，将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动势功角差应按实际情况选取。

#### 2.2.2.4 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，右玉重击将会产生幅值可能超过 2.0 p.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：

(1) 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对其加以保护。

(2) 隔离开关操作气体绝缘全封组合电器(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。

2.2.2.5 3~66kV 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 4.0 p.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可能超过  $2.5\sqrt{2} U_{N.C}$  ( $U_{N.C}$  为电容器的额定电压)。



操作并联电容补偿装置，应采用开断时不重击穿得断路器。对于需频繁投切的补偿装置，宜按图 2.2-1(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.断路器操作器操作频繁且开断是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 2.2-1(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。

#### 2.2.2.6 操作空载变压器和并联电抗器等的过电压

(1) 开断空载变压器右玉断路器强制熄弧(截流)产生的过电压，与断路器像是、变压器铁心材料，绕组形势、回路元件参数和系统接地方式等有关。

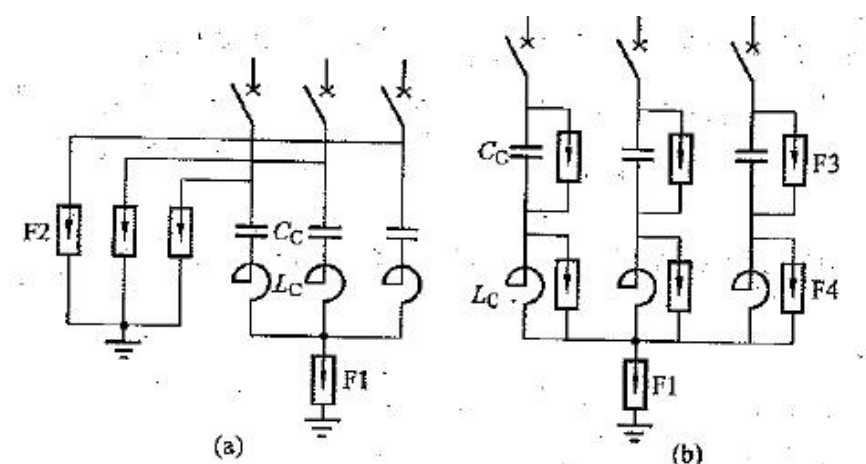


图 2.2-1 并联电容补偿装置的避雷器保护接线

(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。

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

开断具有热轧硅钢片铁心的 110kV 及 220kV 变电器一般不超过 3.0 p.u.： 66kV 及以下变压器一般不超过 4.0 p.u.。

采用熄弧性能强的断电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。

(2) 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。

(3) 空载变压器和并联电抗补偿装置合闸沉声的操作过电压一般不超过 2.0 p.u.,可不采取措施。

2.2.2.7 在开断高压感应电动机时,因短路的截流、三相同时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 2.5 p.u.。开断启动过程中的电动机时,截流过电压和三相同时开断过电压超过 4.0 p.u.,高频重复重击穿过电压可能超过 5.0 p.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 2.0 p.u.,可不采取保护措施。

2.2.2.8 66kV 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当时不同而异。一般情况下最大过电压不超过下列数值:

不接地 3.5 p.u.

消弧线圈接地 3.2 p.u.

电阻接地 2.5 p.u.

具有限流电抗器、电动机负荷,且设备参数配合不利的 3~10kV 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。

2.2.2.9 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其相应标称电压系统下的电压标准规定。避雷器应能承受操作过电压作用的能量。

2.2.2.10 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。

### 3 变电站雷电过电压保护

### 3.1 变电站防直击雷保护

变电站的直击雷过电压保护可采用避雷针或避雷线。主要保护对象包括屋外配电装置、包括组合导线、母线廊道和建筑物等

为保护其它设备而装设的避雷针，不宜装在独立的主控制室和 35kV 及以下变电站的屋顶上。

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户内变电站可不受此限制。

建构筑物如装设防直接雷装置，应采取加强分流、装设集中接地装置、设备的接地点尽最远离避雷针接地引下线的接地点、避雷针接地引下线尽量远离电气设备等防止反击的措施。

主控制室、配电装置室和 35kV 及以下变电所的屋顶如装设防直击雷保护装置时，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，则采用避雷带保护，该避雷带的网格为 8~10m，每隔 10~20m 设引下线接地。上述接地引下线应与主接地网连接，并在连接处加设集中接地装置。

峡谷地区的变电站宜采用避雷线保护。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。

露天布置的 GIS 的外壳不需装设防直击雷保护装置，但应接地。

### 3.2 变电站雷电侵入波过电压保护

变电站设备的雷电冲击过电压主要是指雷击输电线路发生反击或绕击产生的雷电波，侵入波沿输电线路传递到变电站而在变电站设备上产生的雷电过电压。变电站设备的雷电过电压是采取高性能的避雷器及与避雷器相配合的进线保护段等保护措施来进行限制的。避雷器的主要设置原则：1) 正确选择避雷器的形式、参数；2) 合理确定保护接线方式，如台数，装设位置；3) 尽量少的避雷器保护所有设备。

变电站雷电侵入波过电压保护的相关规定可参见《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620-1997)，此处不再赘述。目前，随着计算机技术和数值计算

方法的不断发展，目前宜通过数值仿真，结合系统运行方式来分析计算雷电侵入波对变电站内设备过电压的影响。

## 4 变电站绝缘配合原则

### 4.1 绝缘配合的目的

绝缘配合就是根据系统中可能出现的各种电压和保护装置的特性，来确定设备的绝缘水平；或者根据已有设备的绝缘水平，选择适当的保护装置，以便把作用于设备上的各种电压所引起的设备损坏和影响连续运行的概率，降低到在经济上和技术上能接受的水平。也就是说，绝缘配合是要正确处理各种电压、各种限压措施和设备绝缘耐受能力三者之间的配合关系，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。

### 4.2 绝缘配合的一般原则

不同电网，因结构不同以及在不同的发展阶段，采用了不同的保护设备，可以有不同的绝缘水平。谐振过电压对电气设备和保护装置的危害极大，应在设计和运行中避免和消除出现谐振过电压的条件，在绝缘配合中不考虑谐振过电压。

配电装置中的自恢复绝缘（绝缘子串、空气间隙）和非自恢复绝缘的绝缘强度，在过电压各种波形作用下，均应高于保护设备的保护水平，并考虑各种因素，留有适当的裕度。不考虑各种绝缘之间的自配合。

由于过电压保护的方法不同，一般不考虑线路绝缘与配电装置绝缘之间的配合问题。污秽地区配电装置的外绝缘应加强绝缘或采取其它措施。高海拔地区配电装置的外绝缘，宜首先采用加强保护的方法，选择性能优良的避雷器；其次再考虑加强绝缘或选用高原电器。

### 4.3 绝缘配合的一般条件

#### 4.3.1 标准参考大气条件

绝缘试验是在标准参考大气条件下进行的，标准参考大气条件是：

- |        |                          |
|--------|--------------------------|
| — 温度   | $t_0=20^{\circ}\text{C}$ |
| — 气压   | $b_0=101.3\text{kPa}$    |
| — 绝对湿度 | $h_0=11\text{g/m}^3$     |

当设备的安装地点的大气条件与标准参考大气条件有差异时，应进行大气条件修正。为了使具有额定绝缘水平的设备在 1000m 及以下海拔下也能安全运行，一般对设备的外绝缘按照海拔 1000m 进行修正。

#### 4.3.2 设备上的作用电压

设备上的作用电压按其波形和持续时间可分为下列几种：

—持续工频电压（其值不超过设备最高电压  $U_m$ ，持续时间等于设备设计的运行寿命）

—暂时过电压（包括工频电压升高、谐振过电压）

—缓波前（操作）过电压：

—快波前（雷电）过电压：

—陡波前过电压：

—联合（暂时、缓波前、快波前、陡波前）过电压

#### 4.3.3 试验类型的选择

##### 1) 常规设备的试验类型

对应于不同的系统最高电压，选择不同类型的绝缘试验。一般地，每一最高电压范围内的绝缘性能，仅采用两种绝缘试验就足以检验设备的标准绝缘水平

对于范围 II（即  $U_m > 252\text{kV}$  的系统）内的设备一般选择雷电冲击耐受电压试验和操作冲击耐受电压试验来验证设备的绝缘耐受水平。

在范围 II 中，标准操作冲击耐受电压应当涵盖持续工频电压(如果相关的设备标准中没有规定数值)以及要求的短时工频耐受电压。

##### 2) 变压器、电抗器的截波试验

###### a) 变电站雷电截波过电压

实践证明在变电站产生雷电截波过电压的可能性是存在的，我国对数量最多的 110~220KV 变电站雷电截波发生率的统计数据是 0.5~1.2 次/百所·年，截波发生率的数据不可忽视。特别对于采用多避雷器配置的超高压和特高压变电站，其雷电截波过电压的发生率有可能更高。近区落雷由于没有进线段的衰减作用而具有侵入变电站的雷电波陡度大、幅值高的特点，它造成绝缘子串反击和闪络往往在 2-3  $\mu\text{s}$  内发生，而此时对应的负极性放电电压平均比通常 50%放电电压高 25%左右，这样高的雷电过电压幅值往往会引起变电站入口高压电气设备的外绝缘发生闪络，在变

电站内产生截波，作用于变电站的主变压器等高压电气设备上。近区落雷会使变电站电气设备遭受高幅值截波过电压的作用。

#### b) 变压器截波试验

世界各国对于变压器截波试验有关问题是有过争论和不同看法的，在 20 世纪 80 年代初意大利、法国、丹麦、挪威、瑞士、瑞典、荷兰等 7 国提出对于 220KV~400KV 变压器不进行截波试验的规定。当时 IEC 也将截波试验规定为带电压绕组设备（变压器、并联电抗器、电压互感器）的特定试验项目，不作为必须进行的试验项目，由用户和制造厂自行商定解决。目前由于世界各国对 500KV 变压器，特别是美国、加拿大、前苏联的 750KV 电网的变压器都进行截波试验，因此 IEC 的新标准又进行了修改，将截波试验作为例行试验项目。

我国是坚持对变压器进行截波试验的国家，国家标准 GB311.1-1997（等同于 IEC71.1:1993）《高压输变电设备的绝缘配合》规定，110KV~500KV 变压器雷电冲击截波耐受电压比全波高一级，截波耐受电压比全波平均高 9%~12%。最新发布的国家电网公司企业标准 Q/GPW101-2003《750KV 变电所设计暂行技术规定》电气部分规定，750KV 变压器雷电冲击全波耐受电压为 1950KV，雷电冲击截波耐受电压比全波高一级为 2100KV（高 8%）。

#### 4.3.4 绝缘配合的波形

##### 1) 标准化的电压波形

作为标准化处理，《高压输变电设备的绝缘配合》GB311.1 对绝缘试验电压波形进行了规定：额定短时工频耐受电压具有工频波形；除有绕组的电气设备外，操作冲击电压波至最大值时间 250  $\mu$ s，波尾 2500  $\mu$ s；雷电冲击电压波波头时间 1.2  $\mu$ s，波尾 50  $\mu$ s。

##### 2) 长空气间隙下的操作波波形特点

操作波是决定超高压和特高压变电站外绝缘的控制条件，国外大量的试验证明对于 3m~25m 长空气间隙的操作波 50%放电电压和操作波波头时间之间呈 U 形曲线的关系，即每一个空气间隙在不同的操作波波头时间下有不同的操作波 50%放电电压值，其中对应 U 形曲线最低点的波头时间称为临界波头时间。

## 5 绝缘配合方法

## 5.1 绝缘配合的方法

为确定电网的绝缘水平，采用的方法通常有确定性法（惯用法）、统计法和简化统计法。

确定性法是在惯用过电压（即可接受的接近于设备安装点的预期最大过电压）与惯用耐受电压之间，按照设备制造和电力系统的运行经验选取适宜的配合系数。当设备故障率的统计数据无法通过试验获得时，一般采用确定性法。

统计法旨在对设备的故障率定量，并将其作为选取额定耐受电压和绝缘设计的一个性能指标。

统计法把过电压和绝缘强度都看作是随机变量，在已知过电压幅值及绝缘闪络电压统计特性后，用计算方法求出绝缘闪络的概率来确定故障率。通过逐点对不同绝缘类型和不同网络状态的重复计算可以得到由绝缘故障引起的系统的总故障率。统计法不仅定量地给出设计的安全程度，并能在考虑设备年折旧费、年运行维修费用的基础上按照事故损失最小的原则进行优化设计，选择最佳绝缘。统计法至今只用于自恢复绝缘主要是超高压设备外绝缘的设计。

在简化统计法中，对概率曲线的形状作了若干假定，例如假定过电压满足已知标准偏差的正态分布，而绝缘强度满足修正的维泊尔（Weibull）概率分布，从而可用与一给定概率相对应的点来代表一条曲线。在过电压概率曲线中称该点的纵坐标为“统计过电压”，其概率不大于 2%；而在绝缘耐受电压曲线中则称该点的纵坐标为“统计耐受电压”，设备的冲击耐受电压的参考概率取为 90%。

## 5.2 绝缘配合方法的选择

一般来说，操作过电压的内绝缘采用确定性法，操作过电压的外绝缘采用简化统计法；雷电过电压内外绝缘均采用统计法；空气间隙的确定采用简化统计法。

绝缘配合一般参照《高压输变电设备的绝缘配合》GB311.1 规定的绝缘配合系数对上述方法确定的设备绝缘水平进行校验。

## 5.3 绝缘配合程序

典型设备绝缘配合流程如下图示：

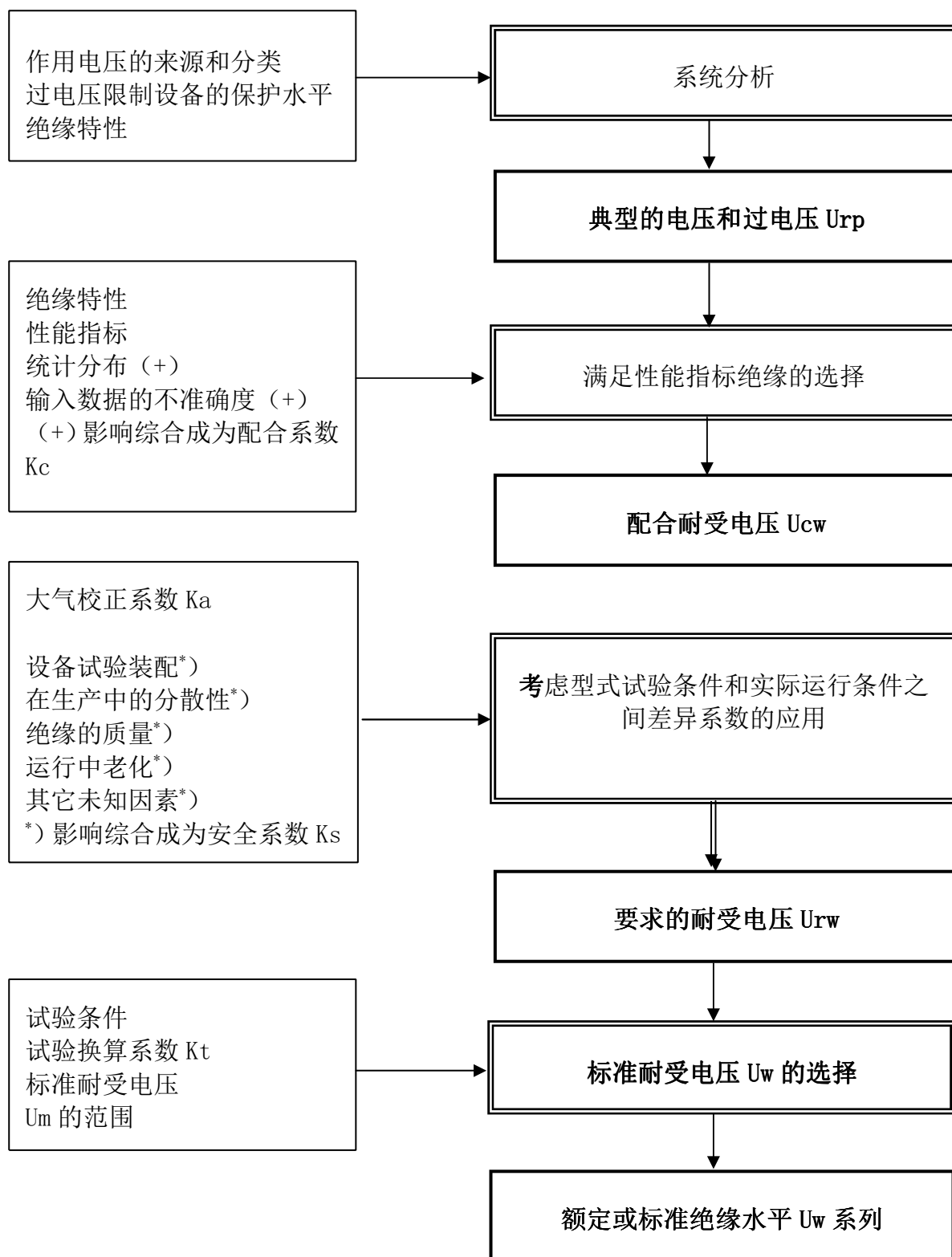


图 5.3-1 设备绝缘配合的一般流程



## 6 电气设备的绝缘配合

### 6.1 电气设备绝缘配合的特点

(1) 电气设备的绝缘配合，是考虑所采用的过电压保护措施后，决定设备上可能的作用电压，并根据设备的绝缘特性及可能影响绝缘特性的因素，从安全运行和技术经济合理性两方面决定设备的绝缘水平。

(2) 设备在运行中可能受到的作用电压，按照作用电压的幅值、波形及持续时间，可分为：

1) 持续工频电压(其值不超过设备最高电压  $U_m$ ，持续时间等于设备设计的运行寿命)；

2) 暂时过电压(包括工频电压升高、谐振过电压)；

3) 缓波前(操作)过电压；

4) 快波前(雷电)过电压；

5) 陡波前过电压。

(3) 设备最高电压的范围：

范围 I： $1\text{kV} \leq U_m \leq 252\text{kV}$ 。

范围 II： $U_m > 252\text{kV}$ 。

(4) 设备绝缘试验类型：

1) 短时(1min)工频试验；

2) 长时间工频试验；

3) 操作冲击试验；

4) 雷电冲击试验；

5) 陡波前冲击试验；

6) 联合电压试验。

操作和雷电冲击试验可以是耐受试验，也可以是 50%破坏性放电试验，它只适用于自恢复绝缘，短时工频是耐受试验。

(5) 范围 I 的设备所规定的短时工频耐受电压，一般均能满足在正常运行电压和暂时过电压下的要求。

(6) 在所有情况下,进行操作过电压和雷电过电压绝缘配合时应考虑:设备安装点的预期过电压值、系统与设备的电气特性、类似的系统的运行经验以及所有保护装置的限压效果。

设备的相对地绝缘的额定耐受电压是确定设备的相间绝缘和纵绝缘额定耐受电压的基础。

(7) 额定操作和雷电冲击耐受电压宜从标准值中选取。

## 6.2 持续工频电压和暂时过电压的绝缘配合

### 6.2.1 一般规则

1) 对正常运行条件,绝缘应能长期耐受设备最高电压。

2) 设备在预期的寿命期内不致因局部放电而使绝缘显著劣化以及在最苛刻的工况下,绝缘不会失去热稳定性。为尽可能符合实际,应用工频电压试验检验,试验时所加电压可高于  $U_m/\sqrt{3}$ ,而持续时间由系统工况决定。同时,应使所有元件上的作用电压与运行时的值成比例。

3) 在有关设备标准中可规定设备耐受工频电压升高的允许时间,并确定有关的试验程序、试验电压及试验条件。

4) 对范围 I 的设备所规定的短时工频耐受电压,一般均能满足在正常运行电压和暂时电压下的要求。

为检验设备老化对内绝缘性能、污秽对外绝缘性能的影响所进行的长时间工频试验,应在有关设备标准中规定。

### 6.2.2 变电所电气设备与工频电压的配合

1) 1 级污秽区变电所电气设备户外电瓷绝缘的爬电比距  $\lambda$  不应小于  $1.60\text{cm/kV}$ (户外电瓷绝缘的瓷件平均直径  $D_m < 300\text{mm}$ )。不同  $D_m$  的爬电距离按下式计算:

$$L \geq K_d \lambda U_m \quad (9-5-12)$$

式中  $L$  — 电气设备户外电瓷绝缘的几何爬电距离,  $\text{cm}$ ;

$K_d$  — 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  $K_d$ :

$$D_m < 300\text{mm} \quad K_d = 1.0$$

$$300\text{mm} \leq D_m \leq 500\text{mm} \quad K_d = 1.1$$

$$D_m > 500\text{mm} \quad K_d = 1.2$$

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 (252kV) 或 1.2 (363、550kV) 倍。

2) 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。

3) 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。

## 6.3 操作过电压下的绝缘配

### 6.3.1 一般规则

1) 相对地绝缘。

a) 电压范围 I 的设备。根据设备上的统计操作过电压水平或避雷器的操作冲击保护水平和设备的绝缘特性, 并取一定的配合因数  $K_c$  计算、选取设备的额定短时工频耐受电压。

b) 电压范围 II 的设备。根据设备上的统计操作过电压水平或避雷器的操作冲击保护水平和设备的绝缘特性并取一定的配合因数  $K_c$  计算、选取设备的额定操作冲击耐受电压。

c) 配合因数  $K_c$ 。选取  $K_c$  时应考到下列因素; 绝缘类型及期特性; 性能指标; 过电压幅值及分布特性; 大气条件; 设备生产、装配中的分散性及安装质量; 绝缘在预期寿命期间的老化试验条件及其他求和因素。对操作冲击, 一般取  $K_c \geq 1.15$ 。

2) 相间绝缘。

a) 电压范围 I 的设备的相间绝缘额定短时工频耐受电压取相应的相对地绝缘的耐受电压值。应保证两类绝缘均满足要求。

b) 电压范围 II 的设备的相间绝缘的额定操作冲击耐受电压等于相应的相对地绝缘的耐受电压值乘以系数  $K_{pe}$ , 通常  $K_{pe} \geq 1.5$ 。

3) 开关设备的纵绝缘。

a) 电压范围 I 的设备的纵绝缘的额定短时工频耐受电压一般取相间的相对地绝缘的耐受电压值, 但隔离断口的耐受电压可高于相应的相对地的数值, 且在开关设备标准中规定。

b) 电压范围 II 的设备的纵绝缘的额定操作冲击耐受电压由两个分量组成, 其一为相对地的额定操作冲击耐受电压; 另一为反极性的工频电压, 其幅值为  $U_m \sqrt{\frac{2}{3}}$ 。

### 6.3.2 电压范围 II 变电所电气设备与操作过电压的绝缘配合

1) 电气设备内绝缘。

a) 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。

b) 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。

c) 断路器同极断口间内绝缘额定操作冲击耐压  $U_{s.d}$  应符合下式要求:

$$U_{s.d} \geq 1.15 U_{p.1} + \sqrt{2} U_m / \sqrt{3}$$

2) 电气设备外绝缘

a) 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%。

b) 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。

c) 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。

## 6.4 雷电过电压下的绝缘配合

### 6.4.1 一般规则

1) 相对地绝缘。对受避雷器保护的设备, 其额定雷电冲击耐受电压由避雷器的雷电冲击保护水平乘以配合因数  $K_c$  计算选定。根据我国情况, 一般取  $K_c \geq 1.4$ 。

2) 相间绝缘。在所有电压范围内, 相间绝缘的额定雷电冲击耐受电压均取相应的相对地绝缘的耐受电压值。

3) 开关设备的纵绝缘。

a) 电压范围 I 的设备纵绝缘的额定雷电冲击耐受电压一般等于相对地绝缘的耐压值, 但隔离断口的耐受电压可高于相应的相对地的数值, 宜在开关设备标准中规定。

b) 电压范围Ⅱ的设备纵绝缘的额定雷电冲击耐受电压由两个分量组成，一为相对地的额定雷电冲击耐受电压；另一为反极性的工频电压，其幅值为(0.7～

$$1.0)\sqrt{\frac{2}{3}}U_m。$$

#### 6.4.2 变电所电气设备与雷电过电压的绝缘配合

1) 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下的残压间的配合系数，取 1.4。

2) 关联电抗器、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下的残压间的配合系数，取 1.4。

3) 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电冲击耐压的 1.1 倍。

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

$$U_{1.d} \geq U_{1.N} + U_m / \sqrt{3}$$

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

### 6.5 电气设备耐受电压的选择

对 3～500kV 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。按 DL/T620-1997 规定，表 6.5-1～表 6.5-3 所列耐受电压数据适用于海拔高度 1000m 及以下地区的电气设备。

(1) 电压范围 I ( $3.5\text{kV} < U_m \leq 252\text{kV}$ ) 电气设备选用的耐受电压。表 6.5-1 给出了相应数据。

表 6.5-1 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 (1min) 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		

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 (1min) 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
		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、1050	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。

(2) 电压范围 II ( $U_m > 252\text{kV}$ ) 电气设备选用的耐受电压。表 6.5-2 给出了相应数据。

(3) 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 6.5-3 给出了相应数据。

表 6.5-2 电压范围 II 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 (1min) 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	1050	1050+205	850	1300	850+295	460	520
		1175	1175+205	950	1425		510	580
500	550	1425	1425+315	1050	1675	1050+450	630	790
		1550	1550+315	1175	1800		680	790

表 6.5-3 电力变压器、高压关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 (kV)	短时 (1min) 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。

## 6.6 电气设备绝缘水平

按 GB311.1-1997《高压输变电设备的绝缘配合》规定，高压电气设备的而受电压标准值、额定绝缘水平、额定耐受电压值如下：

(1) 额定短时工频耐受电压的标准(有效值)有 10, 20, 28, 38, 50, 70, 95, 140, 185, 230, 275, 325, 360, 395, 460, 510, 570, 630, 680, 740kV。

(2) 额定冲击耐受电压的标准值(峰值)有 20, 40, 60, 75, 95, 115, 125, 145, 170, 250, 325, 450, 550, 650, 750, 850, 950, 1050, 1175, 1300, 1425, 1550, 1675, 1800, 1950, 2100, 2250, 2400kV。

(3) 高压输变电设备的额定绝缘水平。

1) 电压范围 I 的设备的标准绝缘水平列于表 6.5-4。在此电压范围内，选取设备的绝缘水平时，首先应考虑雷电冲击作用电压，和每一设备最高电压相对应，给出了设备绝缘水平的两个耐受电压，即

表 6.5-4 电压范围 I ( $1\text{kV} < U_m \leq 252\text{kV}$ ) 的设备的标准绝缘水平 kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定雷电冲击耐受电压(峰值)		额定短时工频耐受电压 (有效值)
		系列 I	系列 II	
3	3.5	20	40	18
6	6.9	40	60	25
10	11.5	60	75 95	30/42***; 35
15	17.5	75	95 105	40; 45
20	23.0	95	125	50; 55
35	40.5	185/200*		80/95***; 85
66	72.5	325		140
110	126	450/480*		185; 200
220	252	(750)**		(325)**
		850		360
		950		395
		(1050)**		(460)**

注 系统标称电压 3~15kV 所对应设备的系统 I 的绝缘水平，在我国公用于中性点直接接地系统

\* 该栏斜线之下数据仅用于变压器类设备的内绝缘。

\*\* 对 220kV 设备，括号内的数据不推荐选用。

\*\*\* 应该数据为设备外绝缘在干燥状态下之耐受电压。

a) 额定雷电冲击耐受电压；

b) 额定短时工频耐受电压。

2) 电压范围 II 的设备的标准绝缘水平列于表 6.5-5。在此电压范围内，选取设备的绝缘水平时，要考虑操作冲击和雷电冲击作用电压，和每一设备最高电压相对应，给出了设备绝缘水平的两个耐受电压，即

a) 额定雷电冲击耐受电压；



b) 额定操作冲击耐受电压。在表 6.5-5 中给出了设备相对地绝缘和相间绝缘的额定操作冲击耐受电压的组合。

3) 设备的绝缘水平与所考虑的设备类型有关, 并且无论用统计法还是惯用法, 这些绝缘水平都可选用。

4) 对同一设备最高电压, 有的在表 6.5-4 和表 6.5-5 中给出两个及以上的绝缘水平。在选用设备的额定耐受电压及其组合时应考虑到电网结构及过电压水平、过电压保护装置的配置及其性能、设备类型及绝缘特性、可接受的绝缘故障率等。

表 6.5-5 电压范围 II ( $U_m > 252\text{kV}$ ) 的设备的标准绝缘水平 kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定操作冲击耐受电压(峰值)					额定雷电冲击耐受电压(峰值)		额定短时工频耐受电压(有效值)
		相对地	相间	相间与相对地之比	纵绝缘 <sup>①</sup>		相对地	纵绝缘	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10**
330	363	850	1300	1.50	950	850 (+295)*	1050	见 6.3.1 3) 条的规定	(460)
		950	1425	1.50			1175		(510)
500	550	1050	1675	1.60	1175	1050 (+450)*	1452		(630)
		1178	1800	1.50			1550		(680)
							1675		(740)

① 纵绝缘的操作冲击耐受电压选取栏 6 或栏 7 之数值, 决定于设备的工作条件, 在有关设备标准中规定。

\* 栏 7 中括号中之数值是加在同一极对应相端子上的反极性工频电压的峰值。

\*\* 栏 10 括号内之短时工频耐受电压值, 仅供参考。

5) 在某些情况下, 可能需要规定不同于表 6.5-4 或表 6.5-5 中的额定耐受电压值, 此时宜从 6.3(1)和 6.3(2)的标准值中选取。

(4) 各类输变电设备, 可取与变压器相同的或高一些的绝缘水平, 应在有关设备标准中规定。为便于制定有关设备标准, 表 6.5-6 和表 6.5-7 中分类给出了设备的额定耐受电压值。

1) 各类设备的额定雷电冲击耐受电压列于表 6.5-6。对变压器类设备应做雷电冲击截波耐受电压试验, 其幅值可比额定雷电冲击耐受电压值高 10%左右。

表 6.5-6 各类设备的雷电冲击耐受电压 kV

系统标称电压 (有效值)	设备最高电压 (有效值)	额定雷电冲击(内、外绝缘)耐受电压(峰值)						截断雷电冲击耐受电压(峰值)
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、电压互感器	高压电力电缆 <sup>①</sup>	高压电器	母线支持绝缘子、穿墙套管	变压器类设备的内绝缘
3	3.5	40	40	40	—	40	40	45
6	6.9	60	60	60	—	60	60	65
10	11.5	75	75	75	—	75	75	85
15	17.5	105	105	105	105	105	105	115
20	23.0	125	125	125	125	125	125	140
35	40.5	185/200*	185/200*	185/200*	200	185	185	220
66	72.5	325	325	325	325	325	325	360
		350	350	350	350	350	350	385
110	126	450/480*	450/480*	450/480*	150	450	450	530
		550	550	550	550			
220	252	850	850	850	850	850	935	950
		950	950	950	950 1050	950	950	1050
330	363	1050				1050	1050	1175
		1175	1175	1175	1175 1300	1175	1175	1300
500	550	1425			1425	1425	1425	1550
		1550	1550	1550	1550	1550	1550	1675
			1675	1675	1675	1675	1675	

① 对高压电力电缆是指热状态下的耐受电压值。

\* 斜线下之数据仅用于该类设备的内绝缘。

截断冲击试验系统的构成应使记录的冲击截波的跌落时间尽量短。截波过零系数不大于 0.3；截断跌落时间一般不大于 0.7us。

2) 各类设备的短时工频耐受电压列于表 6.5-7。

表 6.5-7 各类设备的短时(1min)工频耐受电压(有效值) kV

系统标称 电压 (有效值)	设备最 高电压 (有效值)	额定雷电冲击(内、外绝缘)耐受电压(峰值)				母线支柱绝缘子	
		变压器	并 联 电抗器	耦合电容器、高压电器、 电压互感器和穿墙套管	高压电力 电缆 <sup>①</sup>	湿试	干试
1	2	3*	4*	5**	6**	7	8
3	3.5	18	18	18/25		18	25
6	6.9	25	25	23/30		23	32
10	11.5	30/35	30/35	30/42		30	42
15	17.5	40/45	40/45	50/45	40/45	40	57
20	23.0	50/55	50/55	50/65	50/55	50	68
35	40.5	80/85	80/85	80/95	80/85	80	100
66	72.5	140	140	140	140	140	165
		160	160	160	160	160	185
110	126.0	185/200	185/200	185/200	185/200	185	265
220	252.0	360	360	360	360	360	450
		395	395	395	395	395	495
					460		
330	363.0	460	460	460	460		
		510	510	510	510 570		
500	550.0	630	630	630	630		
		680	680	680	680		
				740	740		

注 表中给出的 330~500kV 设备之短时工频耐受电压仅供参考。

\* 该栏中斜线下的数据为该类设备的内绝缘和外绝缘干状态之耐受电压。

\*\* 该栏中斜线下的数据为该类设备的外绝缘干耐受电压。

3) 范围Ⅱ的开关设备的纵绝缘的耐受电压列于表 6.5-5。

4) 分级绝缘电力变压器中性点的绝缘水平见表 6.5-3。