

### 《高电压技术》

4.4 操作过电压 Switching Overvoltage

2020年02-05月

### 4.4 操作过电压



- §1. 中性点不接地系统电弧接地引起的过电压
- §2. 合闸空载线路引起的过电压
- §3. 切除空载线路引起的过电压
- §4. 切除空载变压器产生的过电压
- §5. GIS中快速暂态过电压(VFTO)

### 绪论



#### ■ 操作过电压产生的原因:

断路器操作和各种故障引起的过渡过程(初始状态 振荡 稳定状态)

#### 特点

与暂时过电压相比,操作过电压通常具有幅值高,存在高频振荡、强阻尼和持续时间短的特点。

#### ■ 常见的操作过电压有:

- 中性点不接地系统中电弧接地过电压
- > 空载线路合闸过电压
- ▶ 切除空载线路过电压
- > 切除空载变压器过电压

### 绪论



#### ■ 操作过电压

》近年来,由于高压断路器灭弧性能的改善,变压器铁芯材料的改进、避雷器制造水平的提高,限制了切除空载线路和空载变压器的过电压,但空载线路合闸过电压仍未得到有效的限制,尤其在超高压及特高压系统中,这种过电压已成为决定电网绝缘水平的主要依据

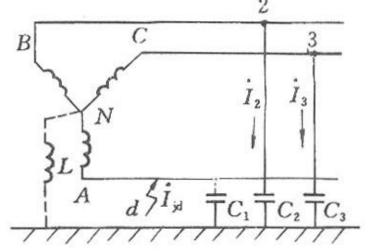
#### 限制措施

- 在低压系统中安装消弧线圈
- 在高压线路上装设并联电抗器
- > 采用带有并联电阻的断路器
- > 采用避雷器

- 中性点不接地系统电弧接地过电压出现的条件
  - 中性点不接地系统,单相接地时,若电弧不能熄灭,也不能稳定燃烧,则由于电弧的重燃,可能引起过电压。
  - 我国35 kV电压等级以下的电网中,经常采用中性点不接地系统(提高供电可靠性),当单相接地电流大于一定值(3-6 kV电网,30 A;10 kV电网,20 A;35 kV电网,10 A)时,电弧便难以熄灭,然而这种电流还不至于形成稳定的电弧,因此形成电弧时而熄灭时而燃烧的情况,在电网中引起电磁能量的振荡,形成间歇性电弧接地过电压。

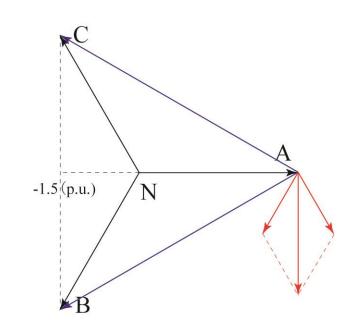
- 过电压发展的物理过程
  - 当发生间歇性电弧接地时,因健全相对地电压的起始值与 稳态值不同,电容与电源电感会产生振荡并引起过电压。

#### 过电压发展的物理过程



中性点不接地系统的单相接地 假定: A相达到最大值时对地闪络

A 
$$+1$$
p.u.  $\longrightarrow$  0p.u.



$$U_{\text{max}} = U_{\text{S}} + (U_{\text{S}} - U_{\text{0}}) = 2U_{\text{S}} - U_{\text{0}}$$

-0.5p.u.  $\longrightarrow -1.5$ p.u. -1.5p.u. +[-1.5p.u. -(-0.5p.u.)] = -2.5p.u.

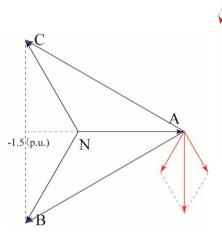
如果A相发生金属性接地,或电弧熄灭后不再重燃,则在健全相上出现的过电 压不会超过2.5 p.u.。



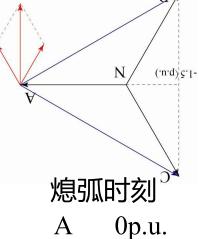
如果发生间歇性电弧,则情况有所不同:

#### 熄弧:

接地电弧通常在过零时熄灭。关于电弧熄灭的理论,目前有几种,如工频电流熄弧理论、高频电流熄弧理论等,一般认为发生在大气中的开放性电弧的熄灭是受工频电流控制的。

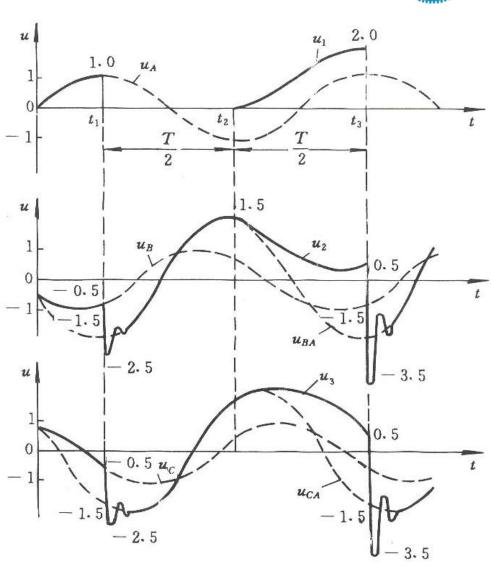


起弧时刻



B +1.5p.u.

C +1.5p.u.



西安交通大學

Xi'an Jiaotong University

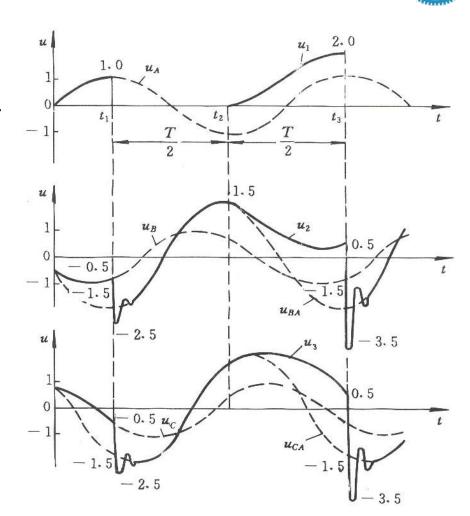
#### 过电压发展的物理过程

#### 半个周期之后:

C 
$$+0.5$$
p.u.  $\longrightarrow$  -1.5p.u.

$$U_{\text{max}} = U_{\text{S}} + (U_{\text{S}} - U_{\text{0}}) = 2U_{\text{S}} - U_{\text{0}}$$

$$2 \times (-1.5 \text{p.u.}) - 0.5 \text{p.u.} = -3.5 \text{p.u.}$$



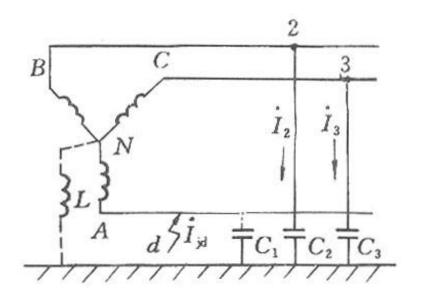
健全相上的过电压为 3.5 p.u.

#### ■ 限制过电压的措施

- 消除电弧接地过电压最根本的途径是消除间歇性电弧。
- > ①中性点直接接地。
  - 使发生单相接地故障时形成很大的单相短路电流,将线路断开, 待故障消除后恢复供电。目前110 kV及以上电网大都采用中性点 直接接地的运行方式。
- > ②中性点经消弧线圈接地
  - 在电压等级较低的配电网中,单相接地事故率相对较大,如采用中性点直接接地方式,势必引起断路器频繁跳闸,这不仅要增设大量的重合闸装置,还会增加断路器的维修工作量,故宜采用中性点绝缘的运行方式。
  - 为减小电容电流,使电弧易于熄灭,我国35 kV及以下电压等级的配电网系采用中性点经消弧线圈接地的运行方式。

#### ■ 限制过电压的措施

- > ②中性点经消弧线圈接地
  - 补偿流过故障点的短路电流,使电弧能自行熄灭,系统自行恢复 到正常工作状态。
  - 降低故障相上的恢复电压上升的速度,减小电弧重燃的可能性。



流过故障点的接地电流为 $I_{jd}$ ,此电流由两个分量组成,一是电容 $C_2$ , $C_3$ 在线电压作用下的电容电流 $I_C$ ,二是消弧线圈电感L在中性点电压 $U_{ph}$ 作用下流过的电感电流 $I_L$ ,

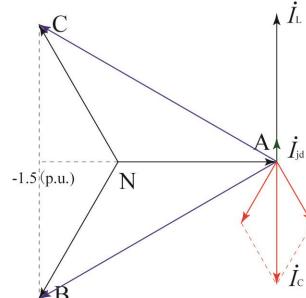
$$\dot{I}_{\rm jd} = \dot{I}_{\rm C} + \dot{I}_{\rm L}$$

#### ■ 限制过电压的措施

- > ②中性点经消弧线圈接地
- > 消谐度
  - 调节消弧线圈的电感量,即可改变接地电流大小。
  - 电感电流补偿电容电流的百分数称为消弧线圈的补偿度(或调谐度),用k<sub>r</sub>表示

$$k_{\rm r} = \frac{I_{\rm L}}{I_{\rm C}} = \frac{U_{\rm ph} / \omega L}{3\omega C U_{\rm ph}} = \frac{1}{3\omega^2 LC} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$$
$$\omega_0 = 1/\sqrt{3LC}$$

脱谐度
$$\gamma_{\rm r}$$
 
$$\gamma_{\rm r} = 1 - k_{\rm r} = \frac{I_{\rm C} - I_{\rm L}}{I_{\rm C}} = 1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$$



#### ■ 限制过电压的措施

- > ②中性点经消弧线圈接地
  - 当 $k_r$ <1,  $\gamma_r$ >0时,表示消弧线圈的电感电流小于线路的电容电流  $(I_c$ > $I_L$ ),故障点有一容性残流,称此为欠补偿。
  - 当 $k_r$ >1,  $\gamma_r$ <0时,表示电感电流大于电容电流( $I_c$ < $I_L$ ),故障点流过感性残流,称此为过补偿。
  - 当 $k_r=1$ ,  $\gamma_r=0$ 时,电感电流与电容电流相互抵消( $I_C=I_L$ ),消弧线圈与三相并联电容处于并联谐振状态,称此为全补偿。
- » 电力系统通常采用<u>过补偿</u>的运行方式
  - 全补偿或接近全补偿状态,因电网三相对地电容不对称,将导致中性点上出现较大的位移过电压危及系统绝缘。采用过补偿就不会出现上述情况。
  - 欠补偿时,如果运行中部分线路退出,则可能出现全补偿。

- 限制过电压的措施
  - > ②中性点经消弧线圈接地

$$\dot{U}_{_{\rm N}} = -\frac{\dot{U}_{_{\rm A}}C_{_{\rm A}} + \dot{U}_{_{\rm B}}C_{_{\rm B}} + \dot{U}_{_{\rm C}}C_{_{\rm C}}}{(C_{_{\rm A}} + C_{_{\rm B}} + C_{_{\rm C}}) - \frac{1}{\omega^2 L}}$$

过于接近全补偿,则中性点 位移过大危及系统绝缘

采用过补偿时,通常 $\gamma_r$  =-0.05  $\sim$ -0.10,即过补偿5  $\sim$  10 %,但应使残流值不超过 10 A,否则还可能出现间隙性电弧。



- 合闸空载线路过电压形成的原因
  - 合闸空载线路产生过电压的根本原因是电容、电感的振荡, 其振荡电压叠加在稳态电压上所致。
  - > 合闸空载线路
    - 正常合闸
    - 自动重合闸 (一般情况下引起的过电压较为严重)
  - 对于超高压输电系统,合闸和重合闸过电压最为重要,因为它对决定系统设备的绝缘水平起着决定性的作用。
  - > 影响因素:
    - 电源容量、系统接线方式、线路长度、合闸相位、开关性能、故障类别、限压措施



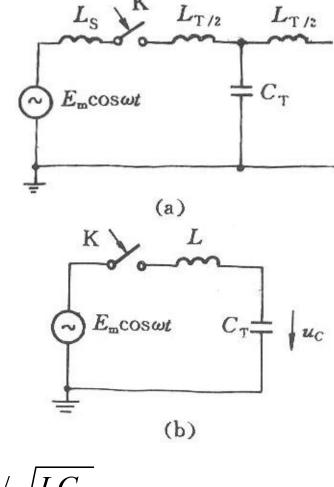
#### 产生过电压的机理

设电源电势为 $E_m \cos \omega t$ 。线路采用T型电路来等值; $L_T$ , $C_T$ 分别为线路总的电感、电容;电源电感为 $L_S$ ; 忽略线路及电源的电阻;并假定线路上的残留电荷为0。  $L = L_S + L_T/2$ 。

$$u_{c}(t) = E_{m}(1 - \cos \omega_{0}t)$$

$$+ \int_{0}^{t} -\omega E_{m} \sin \omega \tau \times (1 - \cos \omega_{0}(t - \tau)) d\tau$$

$$u_{c}(t) = E_{m} \frac{1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_{0}})^{2}} (\cos \omega t - \cos \omega_{0}t)$$



$$=U_{cm}(\cos\omega t - \cos\omega_0 t) \qquad \omega_0 = 1/\sqrt{LC_T}$$



#### 产生过电压的机理

ho 若 $\omega_0$ 远大于电源频率 $\omega$ ,在电源电压到达峰值时合闸,可认为在振荡初期电源电势 $E_m$ 保持不变,

 $(\cos\omega t - \cos\omega_0 t)$  可以达到2。超高压系统中, $\omega_0$  通常等于  $1.5 \sim 3.0\omega$ ,实际上由于线路的电容效应 $U_{\rm Cm} > E_{\rm m}$ ,因此 线路上的电压要超过电源电势的2倍。

若计及损耗,但忽略损耗对ω。的影响,则

$$U_{\rm C}(t) = U_{\rm Cm}(\cos \omega t - e^{-\delta t}\cos \omega_0 t)$$

 $\delta$ 为衰减系数,我国330kV,500kV 电网实测结果, $\delta \approx 30$ 



#### 产生过电压的机理

重合闸的情况下,线路上有残余电荷,相当于电容上有初始电压,可得到电容上电压的表达式为:

$$U_{\rm C}(t) = U_{\rm Cm}(\cos \omega t - A_0 \cos \omega_0 t)$$

$$A_0 = 1 - \frac{U_{C0}}{U_{Cm}}$$
  $A_0$ 值在0~2间

全响应=零输入响应+零状态响应

这种情况下,线路上过电压的最大值可达3 $U_{\rm Cm}$ 。若计及损耗,则低于此值。



#### ■ 影响过电压的因素

- > 合闸相位
- > 残余电荷
- 断路器合闸的不同期
- > 回路损耗
- > 电容效应

#### ■ 限制过电压的措施

- 限制空载线路合闸过电压的措施可以从两方面入手:
  - 一是降低线路的稳态电压分量;
  - 二是限制其自由电压分量。



#### ■ 限制过电压的措施

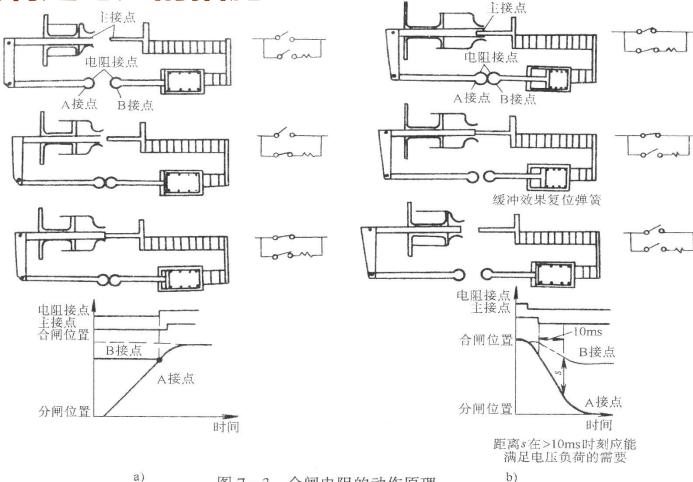
- > ①降低工频电压升高
  - 空载线路上的操作过电压是在工频稳态电压的基础上由振荡产生的。显然,降低工频电压升高会使操作过电压下降。
  - 目前超高压电网中采取的有效措施是装设并联电抗器和静止补偿 装置(SVC),其主要作用是削弱电容效应。

#### > ②断路器装设并联电阻

- 将线路合闸分两个阶段进行。
  - 第一阶段: 带电阻R合闸,即将R与辅助触头串联。由于R对振荡回路起阻尼作用,使过渡过程中的过电压降低。大约8~15 ms。
  - 第二阶段: 主触头闭合,将R短接,电源直接与线路相连,完成合闸操作,这是合闸的第二个阶段。



#### ■ 限制过电压的措施



a) 图 7-3 合闸电阻的动作原理

a) 合闸操作 b) 分闸操作

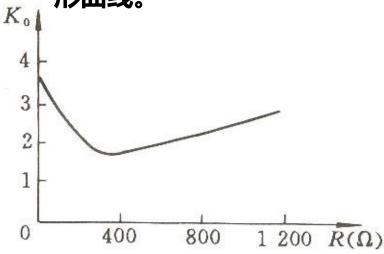
西安克通大學

Xi'an Jiaotong University



#### ■ 限制过电压的措施

- > ②断路器装设并联电阻
- **▶ R的最佳值:** 
  - 第一阶段要求 R 值大, 使阻尼效果较好。
  - 第二阶段要求 R 值小,使短接时,回路振荡程度较弱。
  - 因此,空载线路合闸过电压的大小与合闸电阻值的关系呈一条 V 形曲线。



对  $500 \mathrm{kV}$  线路的断路器,国外大多采用  $400\Omega$ ,国内由于电阻的热容量的原因,大多取  $1000\Omega$  左右。



#### ■ 限制过电压的措施

#### > ③控制合闸相位

空载线路合闸过电压的大小与电源电压的合闸相位有关,因此可以通过一些电子装置来控制断路器的动作时间,在各相合闸时,将电源电压的相位角控制在一定范围内,以达到降低合闸过电压的目的。

#### > 4消除线路上的残余电荷

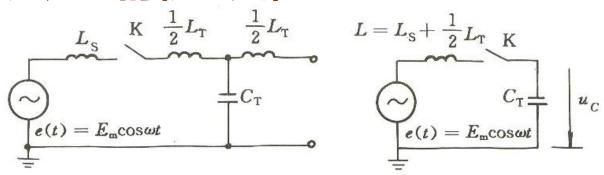
在线路侧接电磁式电压互感器,可在几个工频周波内,将全部残余电荷通过互感器泄放掉。

#### > 5 装设避雷器

在线路首端和末端装设磁吹避雷器或金属氧化物避雷器,当出现较高的过电压时,避雷器应能可靠动作,将过电压限制在允许的范围内。



- 切除空载线路引起过电压的原因:
  - > 电弧重燃
- 过电压产生的物理过程



用T型等值电路来代替一条单相空载线路

•线路容抗远远大于感抗,有微弱的容升效应  $\omega L \ll 1/(\omega C_{\mathrm{T}})$ 

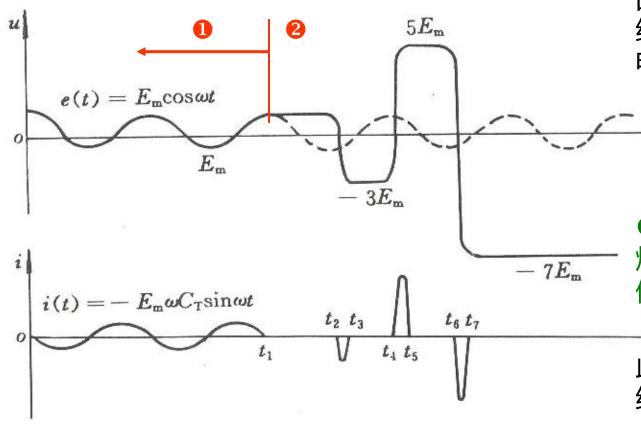
稳定时, 若假定 $e(t) = E_m \cos \omega t$ , 则 $i=-\omega C_T E_m \sin \omega t$  (忽略电感)

•回路的自振角频率

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC_{\rm T}}$$



#### ■ 过电压产生的物理过程



#### ❶断路器开断前:

回路流过容性电流, 线路电压约等于电源 电压。

$$\omega L \ll 1/(\omega C_{\rm T})$$

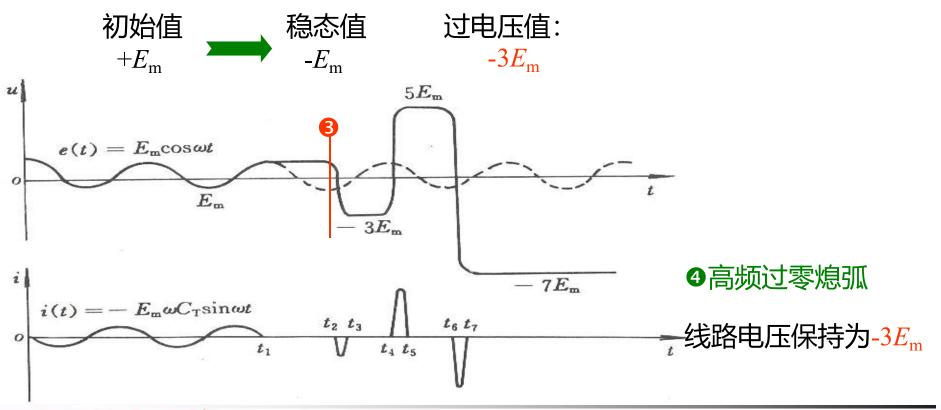
②断路器开断容性电流并 熄弧(电源电压达到最大 值 $\pm E_m$ ,电流过零点):

此后电源与线路断开, 线路保持一个直流电压 ( $\pm E_{\rm m}$ ),电源电压继续 变化。



#### ■ 过电压产生的物理过程

 $\Im$ 第一次重燃 半个工频周期之后电源电压反向,断路器触头之间电压为 $2E_m$ ,如果此时断 路器触头之间介质的绝缘强度没有恢复到一定的值,就可能发生电弧重燃。



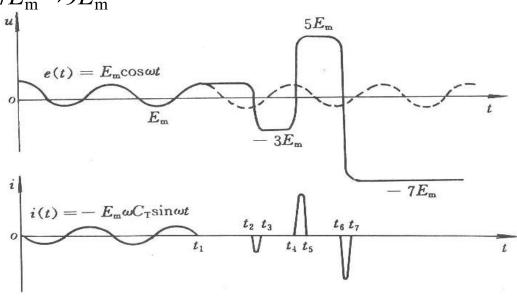


#### ■ 过电压产生的物理过程

重复步骤:

反向 ——→ 燃弧 ——→ 熄弧 ↑

线路电压发展:  $-3E_{\rm m} \rightarrow 5E_{\rm m} \rightarrow -7E_{\rm m} \rightarrow 9E_{\rm m}$ 



系统实测结果表明,超过  $3E_m$  的过电压概率是很小的,这是因为过电压受多种因素影响的缘故。





#### ■ 影响过电压的因素

#### > 断路器的性能

 如前所述,断路器中电弧的重燃是产生过电压的根本原因。如果 断路器触头分得很快,触头间绝缘恢复强度的上升速度大于触头 间恢复电压上升速度,则电弧就不会发生重燃,当然也就不会出 现高的过电压。

#### **,中性点接地方式**

- 在中性点直接接地的电网中,虽然存在线路间的耦合,但各相可 自成独立回路,切除空载线路的过程基本上和以上讨论的单相线 路情况一样。
- 在中性点非直接接地电网中,三相断路器分闸不同期会构成瞬间的不对称电路,使中性点产生位移,相间的耦合,使分闸过程变得复杂,过电压增高(一般会比中性点直接接地电网高出 20% 左右)。



#### ■ 影响过电压的因素

#### > 损耗

- 切除空载线路出现过电压后,线路上会产生强烈的电晕,电晕要消耗能量,相应地降低了过电压。
- 电源及线路损耗也会使过电压降低。

#### > 其它

- 若母线上有很多出线时,相当于加大了母线的电容,电弧重燃后, 线路上的残余电荷重新分配,改变了起始值,因而降低了过电压。
- 当线路装有电磁式电压互感器时,将泄放线路上的残余电荷,从 而降低了过电压。



#### ■ 限制过电压的措施

- > 采用不重燃断路器
  - 国内外制造实践已证明,制造不重燃断路器是完全可能的。我国的 220kV 断路器在限制切除空载线路过电压方面的性能已大有改善,330kV,500kV 断路器基本做到了电弧不重燃。

#### > 在断路器装设分闸电阻

- 在切除线路时,先打开主触头,此时电源通过分闸电阻 R 仍和线路相连,线路上的残余电荷通过分闸电阻向电源释放,R 上的压降就是主触头两端的恢复电压。R 越小,主触头恢复电压就越小,即不会产生重燃。
- 当经过一段时间后,辅助触头才打开,此时它的恢复电压也较低,不会发生电弧的重燃;即使发生重燃,R将对其振荡过程产生阻尼,使过电压降低。



#### ■ 限制过电压的措施

- > 线路上装设泄流设备
  - 由前述分析可知,在线路侧若接有并联电抗器或电磁式电压互感器,都能使线路上的残余电荷得以泄放或产生衰减振荡,改变幅值与极性,最终降低断路器间的恢复电压,减少重燃的可能性,达到降低过电压的目的。

#### > 装设避雷器

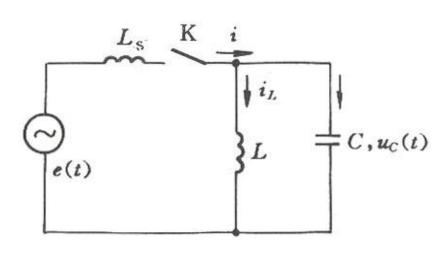
在线路首末端装设可以限制操作过电压的磁吹避雷器或金属氧化物避雷器。



- 切除空载变压器引起过电压的原因
  - > 电弧熄弧, 电感能量转化为电容能量
    - 在正常运行时,空载变压器可等值为一激磁电感,因此切除空载 变压器相当于切除一个小容量的电感负荷。
    - 在切断小电感电流时,由于能量小,通常弧道中的电离并不强烈, 电弧很不稳定;加之断路器去电离作用很强,可能在工频电流过 零前使电弧电流截断而强制熄弧。
    - 由于截流留在电感中的磁场能量转化为电容上的电场能量,从而产生了过电压。



#### ■ 过电压产生的物理过程



切断空载变压器的等效电路

L为变压器的激磁电抗;C为变压器本身及连接母线等的对地电容,其数值视具体情况而定,约为几百至几干皮法,e(t) 为电源电势; $L_s$ 为电源电感。

开断前, 
$$\dot{I}=\dot{I}_{\mathrm{L}}+\dot{I}_{\mathrm{C}}pprox\dot{I}_{\mathrm{L}}$$

熄弧时,若电流为 $I_0$ ,电压为 $U_0$ ,则:

**电感储存能量:** 
$$W_{\rm L} = \frac{1}{2}LI_0^2$$

电容储存能量: 
$$W_{\rm C} = \frac{1}{2}CU_0^2$$



#### ■ 过电压产生的物理过程

熄弧后, 电感续流, 电感能量全部转化为电容能量:

$$\frac{1}{2}CU_{\text{Cmax}}^2 = \frac{1}{2}LI_0^2 + \frac{1}{2}CU_0^2$$

$$U_{\text{Cmax}} = \sqrt{\frac{L}{C}I_0^2 + U_0^2} \approx \sqrt{\frac{L}{C}I_0^2} = I_0 Z_{\text{m}}$$

$$L$$
大 $C$ 小 $\longrightarrow$ 过电压高 $I_0$ 大

一般情况下, $I_0$ 并不大,极限值为激磁电流的最大值,只有几安到几十安,可是变压器的特征阻抗  $Z_m$  很大,可达上万欧,故能产生很高的过电压。



#### ■ 影响过电压的因素

#### > 断路器的性能

- 切除空载变压器引起的过电压与<mark>截流数值</mark>成正比,断路器截断电流的能力愈大,过电压  $U_{Cmax}$  就越高。
- 在断路器开断变压器的过程中,由于断开的变压器侧有很高的过电压,而电源侧则是工频电源电压,因此,当触头间分开的距离还不够大时,在较高的恢复电压作用下,可能产生电弧重燃,向电源侧泄放能量,使过电压有所降低。

#### > 变压器的参数

- 变压器 L 愈大,C 愈小,则过电压愈高。
- 当电感中的磁场能量不变,电容 C 愈小时,过电压也愈高。

#### > 其他

变压器的相数、线组接线方式、铁芯结构、中性点接地方式、断路器的断口电容,以及与变压器相连的电缆线段、架空线段等。





#### 快速暂态过电压

- » 隔离开关操作时电弧重燃
  - 隔离开关分合空母线操作属于常规操作,在分合空母线时,由于触头运动速度慢(1 cm/s数量级),开关本身的灭弧能力差,触头间会发生多次击穿或燃弧,引起的阶跃波(3-20 ns)在GIS中传播并折反射造成快速暂态过电压(Very Fast Transient Overvoltage)。
- > 幅值
  - <2 p.u., 也可超过2.5 p.u., 低于雷电耐受。
- > 陡度
  - 电压上升时间3-20 ns

$$T = 13.3K_{\star}/(\Delta u / s)$$

式中 K : Toepler 火花常数(50 kV·ns/cm)

 $\Delta u$  : 击穿前电压(kV)

s : 火花长度(cm)



#### 快速暂态过电压

- > 频率
  - 数十至数百干赫兹基本振荡: 由系统决定;
  - 数十兆赫兹的高频振荡: 行波发展形成, VFTO的主要部分;
  - 数百兆赫兹的特高频振荡: 幅值较低。

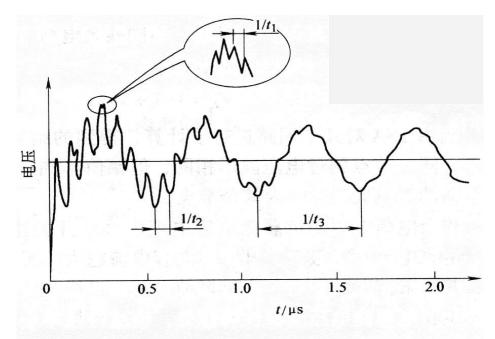


图 13-8 隔离开关闭合引起的典型快速暂态过电压波形  $1/t_1$  段为极高频率, $1/t_2$  段为中等频率, $1/t_3$  段为低等频率





#### ■ 影响因素

#### > ①残余电荷

- 电源侧、母线侧以及支撑绝缘子上的过电压幅值与残余电荷近似 呈线性关系。
- 一般地,不同残余电荷 $(x_1, x_2)$ 与所对应的电压幅值 $(V_{x1}, V_{x2})$ 之间具有下列关系(均以标么值表示):

$$V_{x_2} = \left[ (1 + x_2) V_{x_1} + x_1 - x_2 \right] / (1 + x_1)$$

- 在不同残余电荷下,同一节点的过电压波形相同,但幅值不同;
- VFTO幅值较大的节点和操作支路上受残余电荷的影响大于GIS内 其余节点;
- 残余电荷电压与负载侧电容电流大小、开关速度、重燃时刻及母 线上的泄漏有关。其中,电容电流影响最大。开断前电容电流越 大,母线上储存的电荷越多,残余电荷电压就越高。



#### ■ 影响因素

#### $\triangleright$ ②变压器入口电容 $C_{\mathrm{T}}$

- 在分析变电所的防雷保护时,因雷电波作用时间很短,可以忽略变压器绕组中的电感电流,将变压器用归算至首端的对地电容来代替,通常称为入口电容。GIS中的VFTO频率很高,用 $C_T$ 等效变压器并不失去准确性。
- 变压器的入口电容和它的结构、电压等级、容量有关。一般来说,电压等级越高、变压器额定功率越大, $C_{\mathrm{T}}$ 也相对越大。
- VFTO的幅值随入口电容的增加而增加,有计算表明: $C_T$ 每增加 1000pF, VFTO幅值约增加0.2 (p.u.)。主要原因是在断口电弧重燃 前,变压器的等值电容储存了一定的能量,触头击穿后的放电所 致。 $C_T$ 越大储存的能量越多,VFTO的幅值自然越大。
- 进一步研究表明:随着 $C_T$ 的增加,VFTO的幅值不一定始终增加,这决定于GIS的结构,特别是所操作母线的尺寸,以及操作的方式。



#### ■ 影响因素

- > ③电压的上升时间T<sub>r</sub>
  - GIS中冲击电压的上升时间 $T_r$ 在3-20ns之间;
  - $T_r$ 增加使VFTO幅值下降,因为此时会表现出一种阻尼作用,使那些 $T_r$ 较小时出现的暂态电压的极高频分量消失。
- > 4GIS的支路长度
  - GIS支路的长度对VFTO幅值的影响较大,但没有明显的规律。
- > ⑤开关弧道电阻R<sub>arc</sub>的影响
  - 开关弧道电阻R<sub>arc</sub>对过电压有阻尼作用,其值越大,过电压幅值越小。因此,可以考虑在隔离开关上串联电阻降低过电压幅值。
- > ⑥其他因素
  - GIS的布置,内部结构,接线方式及外部设备等。



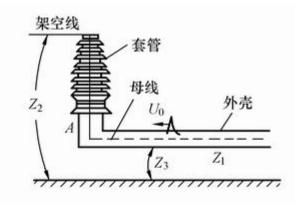
#### VFTO的危害

#### ▶ 暂态地电位升高 (TGPR)

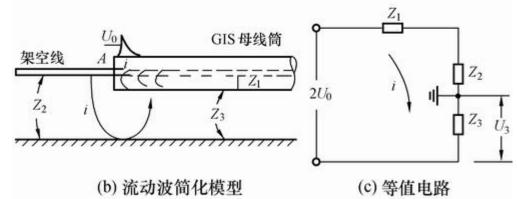
当母线上流过频率很高的VFTO波时,由于集肤效应,VFTO波仅沿母线的外表层及外壳的内表层流动,外壳电位为0。

当VFTO波到达套管处时会发生折反射,如图(b)所示,便是VFTO到达A点后电流的流通路径示意图,其等值电路图如图(c)所示。根据该等值电路可计算出外壳上A点处的电压U<sub>3</sub>为:

$$U_{_{3}}=2U_{_{0}}\times\frac{Z_{_{3}}}{Z_{_{1}}+Z_{_{2}}+Z_{_{3}}}$$



(a) 母线结构



 $U_0$  — VFTO;  $Z_1$  — 母线对外壳的波阻抗;  $Z_2$  — 套管外侧架空线路的波阻抗;  $Z_3$  — 母线外壳对地的波阻抗



#### VFTO的危害

- > 对二次设备的影响
  - VFTO可以通过电压互感器、电流互感器内部的杂散电容传入与 其相连的二次电缆;
  - 也可通过接地网和电缆的屏蔽层耦合到二次设备,从而影响到二次设备的正常运行。

#### > 对变压器的影响

- VFTO可能危及到与GIS相连的变压器的安全,我国发生过由于 VFTO导致变压器损坏的事例(大亚湾,1992年)。
- VFTO在变压器处可达0.49MV/μs, 其危害比截波更严重;
- VFTO所含有的谐波分量会在变压器绕组的局部引起共振。



#### VFTO的防护

- > 快速动作隔离开关(弹簧储能操作机构)
- > 合闸电阻
- > 铁氧体磁环 (抑制高频)
- > 改变操作程序和简化接线
- > 其他措施
  - 采用电容分区的绕组结构,提高端部匝间绝缘厚度,增加近区线端匝间垫层或加小角环,合理选择入口电容,出口装设避雷器。



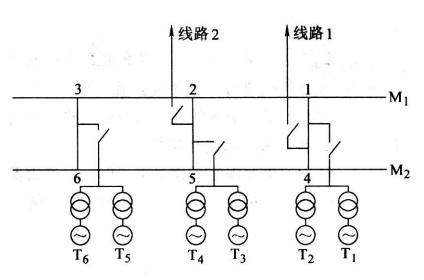


图 13-9 某水电站进、出线示意图

建立元件模型,对各种运行方式分别进行计算。

元件	等值电路	参数值
GIL 母线	<b>←</b> •	波阻抗为 92.68Ω, 波速为 2.77×10 <sup>8</sup> m/s
GIS 母线	<b>←</b>	波阻抗为 85.47 $\Omega$ ,波速为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$
支持绝缘子	<u>-</u> ±	等效电容为 20pF
闭合的断路器	<b>-</b> ₽₽₽	两端线路同 GIS; 触头波阻 抗为 $30\Omega$ , 波速为 $3\times10^8$ m/s
断开的断路器	<b>←₽</b> ₩ <b>₽</b>	两端线路同 GIS; 断口电容 为 600pF
闭合的隔离开关	<b>←</b>	同 GIS 母线
燃弧的隔离开关	<b>-</b> <del>-</del>	两端线路同 GIS; 电弧电阻 为 R(t)
电力变压器		入口电容为 4228pF
电流互感器	<del>- ±</del>	入口电容取为 100pF
电容式 电压互感器	<u>±</u>	入口电容取为 4000pF
避雷器	≠	参数如表 4-5
架空线 (终端)		263.73Ω



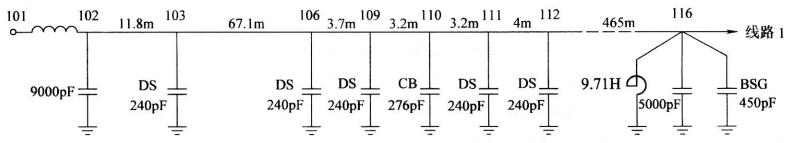


图 13-10 某种运行方式下的等效计算电路

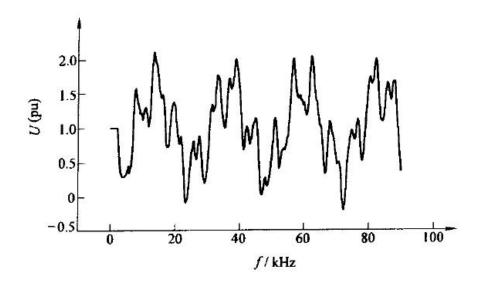


图 13-11 变压器端部 VFTO 波形

幅值: 2.189 p.u.

频谱:

- •50 kHz左右,基频分量
- •0.1-1.5 MHz, 特快瞬变过

程频率

•2 MHz,特高频分量