



高电压技术

屠幼萍

 +80795842, 13691145432

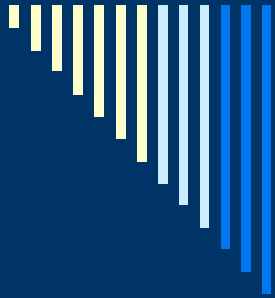
 typ@ncepu.edu.cn



华北电力大学
North China Electric Power University

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





第 18 讲

内部过电压概论

- 内部过电压的分类
- 工频过电压概述
- 谐振过电压概述
- 操作过电压概述
- 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

第一节 内部过电压的分类

■ 内部过电压的定义

电力系统中由于**断路器操作、故障发生及消失或其他原因**，使系统参数发生变化，引起电网内部**电磁能量转化或传递**所造成的电压升高

导线的折断

非线性电感（磁饱和现象）满足谐振的条件

通过电容的静电耦合和互感的电磁耦合，在相邻送电线路之间或变压器绕组之间

第一节 内部过电压的分类

■ 内部过电压的特点

- 过电压的能量来源于系统本身，其幅值与系统标称电压成正比，用 K_n 表征过电压的高低

$$K_n = \frac{\text{内过电压幅值}}{\text{系统最高运行相电压幅值}}$$

- 影响因数有系统结构、中性点运行方式、元件的性能参数、故障性质及操作过程等
- 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、持续时间不相同

第一节 内部过电压的分类

■ 内部过电压的分类

- **操作过电压** 因操作或故障引起的暂态电压升高
- **暂时过电压** 暂态电压后出现的持续时间较长的工频电压升高或谐振现象，过电压具有稳态性质

工频过电压 在正常或故障时出现幅值超过最大工作电压、频率为工频或接近工频的电压升高，或称工频电压升高

谐振过电压 由于操作或故障使系统电感元件与电容元件参数匹配时，发生谐振，产生过电压

内部过电压

暂时过电压

(*resonance*)

谐振过电压

线性谐振

铁磁

参数

工频电压升高

空载长线路的电容效应

不对称的接地故障

甩负荷

(*Power Frequency Voltage Rise*)

(*Temporary*)

操作过电压 (0.1s以内)

合空线

切空线

切空变

解列

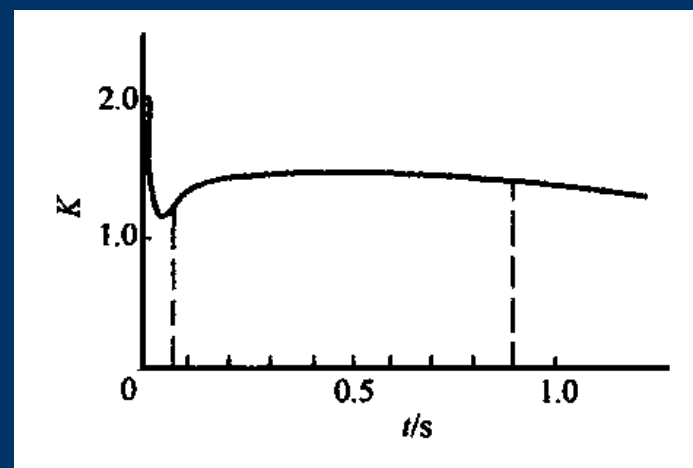
弧光接地

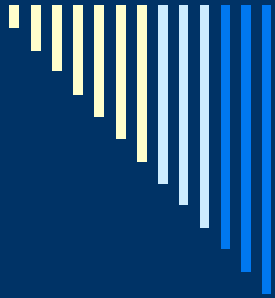
(*Switching*)

500kV、336km空载线路合闸过电压

倍数 K 随时间的变化曲线

- 合闸后0.1秒内的电压升高：是高幅值、强阻尼、高频率的操作过电压
- 0.1秒至1秒内的电压升高：是由于发电机的调压装置的惰性和线路的电容效应，称为暂时工频电压升高
- 大于1秒后，发电机自动电压调整器发生作用，电压下降，2、3秒后，系统进入稳定状态，这时主要是长线路电容效应引起的稳态工频电压升高





第 18 讲

内部过电压概论

- 内部过电压的分类
- 工频过电压概述
- 谐振过电压概述
- 操作过电压概述
- 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

第二节 工频过电压概述

■ 工频过电压的定义

在正常或故障时出现幅值超过最大工作电压、频率为工频或接近工频的电压升高，或称工频电压升高

■ 工频过电压的分类

按产生的原因分类有

空载长线路的电容效应

不对称接地故障

负荷突变

■ 工频过电压的分类

空载长线路的电容效应



当首端的输入阻抗为容性，计及电源内阻抗的影响(感性)时，不仅使线路末端电压高于首端，而且使线路首、末端电压高于电源电动势

不对称接地故障



以单相接地故障最为常见，且引起的工频电压升高也最严重

负荷突变



断路器跳闸前输送负荷的大小、空载长线路的电容效应、发电机励磁系统及电压调整器的特性、原动机调速器及制动设备的惰性

第二节 工频过电压概述

■ 讨论工频过电压的意义

- 直接影响操作过电压的幅值（前合闸案例）
- 持续时间长的工频电压升高仍可能危及设备的安全运行（油纸绝缘局放、绝缘子污闪、电晕等）
- 在超高压系统中，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

母线侧 1.3p.u.

线路侧 1.4p.u.

500kV空载变压器1.3p.u.允许持续1min

500kV并联电抗器1.4p.u.允许持续1min

第二节 工频过电压概述

■ 讨论工频过电压的意义

- 决定避雷器额定电压（灭弧电压）的重要依据

3、6、10kV系统 工频电压升高可达系统最高运行线电压的1.1倍，避雷器的额定电压（灭弧电压）规定为系统最高运行线电压的1.1倍，称为**110%避雷器**

例如10kV系统的最高运行线电压按 $1.15U_e$ 考虑，避雷器的额定电压（灭弧电压）为12.7kV

➤ 决定避雷器额定电压（灭弧电压）的重要依据

35~60kV系统，工频电压升高可达系统的最高运行线电压，避雷器的额定电压（灭弧电压）规定为系统最高运行电压的100%，称为**100%避雷器**

例如**35kV**阀型避雷器的额定电压（灭弧电压）为**41kV**

110、220kV系统，工频电压升高可达系统最高电压的0.8倍，避雷器的额定电压（灭弧电压）则按系统最高电压的80%确定，称为**80%避雷器**

例如：**FZ-110J**的灭弧电压为**100kV**

➤ 决定避雷器额定电压（灭弧电压）的重要依据

330kV及以上系统，输送距离较长，计及长线路的电容效应时，线路末端工频电压升高可能超过系统最高电压的80%，则根据安装位置的不同分为：**电站型避雷器（即80%避雷器）及线路型避雷器（即90%避雷器）两种**

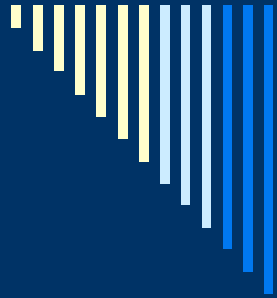
第二节 工频过电压概述

■ 工频过电压的限制措施

装设并联电抗器：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

可同时降低线路首端及末端的工频电压升高

选择合适的电抗器容量和位置来控制工频电压升高在允许范围内



第 18 讲

内部过电压概论

- 内部过电压的分类
- 工频过电压概述
- **谐振过电压概述**
- 操作过电压概述
- 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

第三节 谐振过电压概述

■ 谐振过电压特点及分类

电感元件： 电力变压器、互感器、发电机、消弧线圈、电抗器、线路导线电感等

电容元件： 线路导线对地和相间电容、补偿用的并联和串联电容器组、高压设备的杂散电容

当系统进行操作或发生故障时，电感、电容元件可形成各种振荡回路，如某一自由振荡频率等于外加强迫频率，发生谐振，系统元件上出现过电压

第三节 谐振过电压概述

■ 谐振过电压特点及分类

- 谐振是一种周期性或准周期性的运行状态，直到破坏谐振的条件出现
- 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

谐振过电压危及电气设备的绝缘

持续的过电流烧毁小容量的电感元件，还影响保护装置的工作条件，如避雷器的灭弧条件

第三节 谐振过电压概述

■ 谐振过电压特点及分类

- 系统中的有功负荷是阻尼振荡和限制谐振过电压的有利因素
- 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

线性电感 → 线性谐振

非线性电感 → 铁磁谐振

周期性变化的电感 → 参数谐振

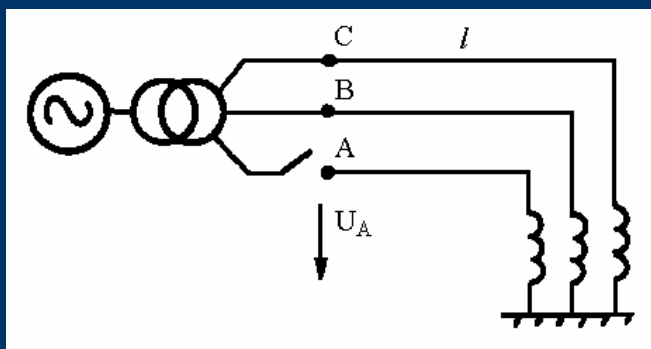
第三节 谐振过电压概述

■ 线性谐振

谐振回路由不带铁芯的电感元件（如输电线路的电感、变压器的漏感）或励磁特性接近线性的带铁芯的电感元件（如消弧线圈，其铁芯中有气隙）和系统中的电容元件所组成。在正弦电源作用下，系统自振频率与电源频率相等或接近时，可能产生线性谐振

■ 线性谐振

- 消弧线圈补偿电网：消弧线圈与导线对地电容串联谐振，或接近谐振，中性点出现危险的过电压
- 超高压电网：



线路末端接并联电抗器
首端断路器非全相操作

断开相（A相）有工频电容传递过电压（**相间电容的耦合作用**）

C_{BA} 、 C_{CA} 与 L_A 构成**串联谐振回路**，参数配合不当时在断开相出现较高的工频谐振过电压

第三节 谐振过电压概述

■ 非线性谐振（铁磁谐振）

谐振回路由带铁芯的电感元件（如空载变压器、电压互感器）和系统的电容元件组成。因为铁芯电感元件的饱和现象，使回路的电感参数是非线性的，在满足一定谐振条件时，会产生铁磁谐振，并有许多特有的性质

■ 非线性谐振（铁磁谐振）

➤ 断线引起的铁磁谐振过电压

断线后非全相运行，可能组成多种串联谐振回路，回路中的电感可以是电网中空载或轻载运行的负载变压器的励磁电感以及消弧线圈的电感，回路中的电容可以是导线对地和相间的部分电容，电感线圈对地杂散电容

■ 非线性谐振（铁磁谐振）

➤ 电磁式电压互感器引起的铁磁谐振过电压

电网出现**某些扰动**，如电压互感器的突然合闸、瞬间单相弧光接地使健全相电压突升至线电压、故障相接地消失时可能有电压的突然上升，在这些暂态中的涌流使**电压互感器三相电感饱和**，且饱和程度不同，电网三相对地阻抗明显不同，此时与设备电容或对地电容构成谐振回路，可能激发起各种谐波谐振

■ 非线性谐振（铁磁谐振）

➤ 传递过电压

当系统中发生不对称接地故障或断路器不同期操作时，可能出现**明显的零序工频电压**，通过**静电和电磁耦合**在相邻输电线路之间或变压器绕组之间产生工频传递现象

若与接在电源中性点的**消弧线圈或电压互感器等铁磁元件组成谐振回路**，还可能产生**线性谐振或铁磁谐振传递过电压**

■ 非线性谐振（铁磁谐振）

➤ 铁磁谐振的特点

相位反倾现象：回路电流由电感性突变为电容性

外激发现象：需要经过过渡过程建立起谐振，维持很长时间不会衰减

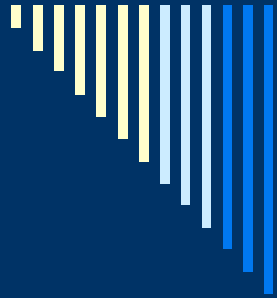
系统的突然合闸、发生故障以及故障的消除等，这些可造成铁芯电感两端的短时电压升高、大电流的振荡过程或电感中的涌流现象

自激现象：没有外界的“冲击扰动”，工作在谐振状态

第三节 谐振过电压概述

■ 参数谐振

谐振回路由**电感参数作周期性变化的电感元件**（如凸极发电机的同步电抗在 $X_d \sim X_q$ 的周期性变化）和系统的电容元件（如空载长线）组成回路，当参数配合时，通过电感的周期变化，不断向谐振系统输送能量，将会造成参数谐振过电压



第 18 讲

内部过电压概论

- 内部过电压的分类
- 工频过电压概述
- 谐振过电压概述
- **操作过电压概述**
- 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

第四节 操作过电压概述

- 操作过电压发生在由于“操作”引起的过渡过程
 - “操作”：分、合闸空载线路
 - 分、合闸空载变压器、电抗器
 - 各类故障，例如接地故障、断线故障等
 - 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，转换常常是强阻尼的、振荡性的过渡过程

第四节 操作过电压概述

- 与工频电压升高和谐振过电压相比，其特点：
 - 过电压幅值高
 - 强阻尼、高振荡性
 - 持续时间短（几个到几十个毫秒）
- 操作过电压的幅值和持续时间与**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**，因此过电压幅值和持续时间也具有**统计性**

第四节 操作过电压概述

■ 操作过电压类型

- 间歇电弧接地过电压
- 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）
- 空载线路分闸过电压（开断电容性负载，还包括电容器组等）
- 空载线路合闸过电压（包括计划性、重合闸）
- 解列过电压

第四节 操作过电压概述

- 决定电力系统绝缘水平的依据之一
 - 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就非常重要

第四节 操作过电压概述

- 规程规定选择绝缘时计算用操作过电压倍数
 - 相对地绝缘

系 统	过电压倍数
35~60kV及以下系统（非直接接地）	4.0
110~154kV系统（非直接接地）	3.5
110~220kV系统（直接接地）	3.0
330kV系统（直接接地）	2.75
500kV系统（直接接地）	2.0或2.2

■ 规程规定选择绝缘时计算用操作过电压倍数

➤ 相间绝缘

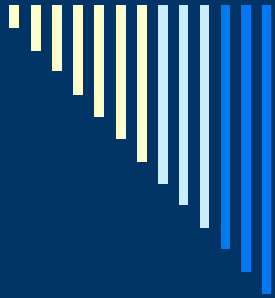
35~220kV的相间操作过电压可取相对地的1.3~1.4倍

330kV的相间操作过电压可取相对地的1.4~1.45倍

500kV的相间操作过电压可取相对地的1.5倍

■ 采取必要措施将操作过电压限制在规定水平以下

- 线路上装设并联电抗器，限制工频电升高
- 改进断路器性能，采用带有并联电阻的断路器
- 采用金属氧化物避雷器限制操作过电压



第 18 讲

内部过电压概论

- 内部过电压的分类
- 工频过电压概述
- 谐振过电压概述
- 操作过电压概述
- 内部过电压案例

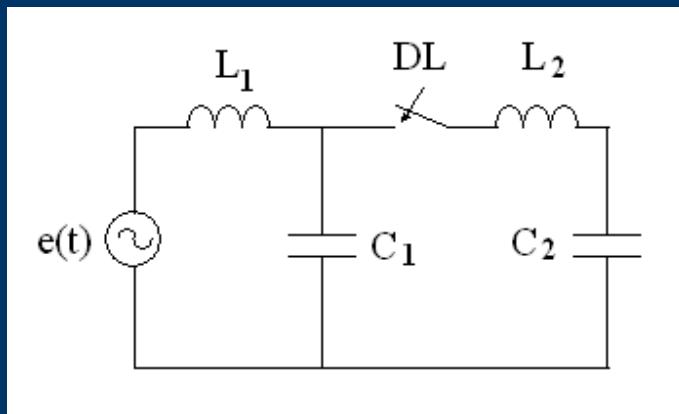
-----切空线操作过电压

第五节 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

- 原因是分闸过程中触头间电弧重燃现象所引起的
- 过电压产生原理

➢ 开断空载线路等值电路



L_1 : 电源等值漏感

L_2 : 线路电感

C_1 : 母线侧对地电容

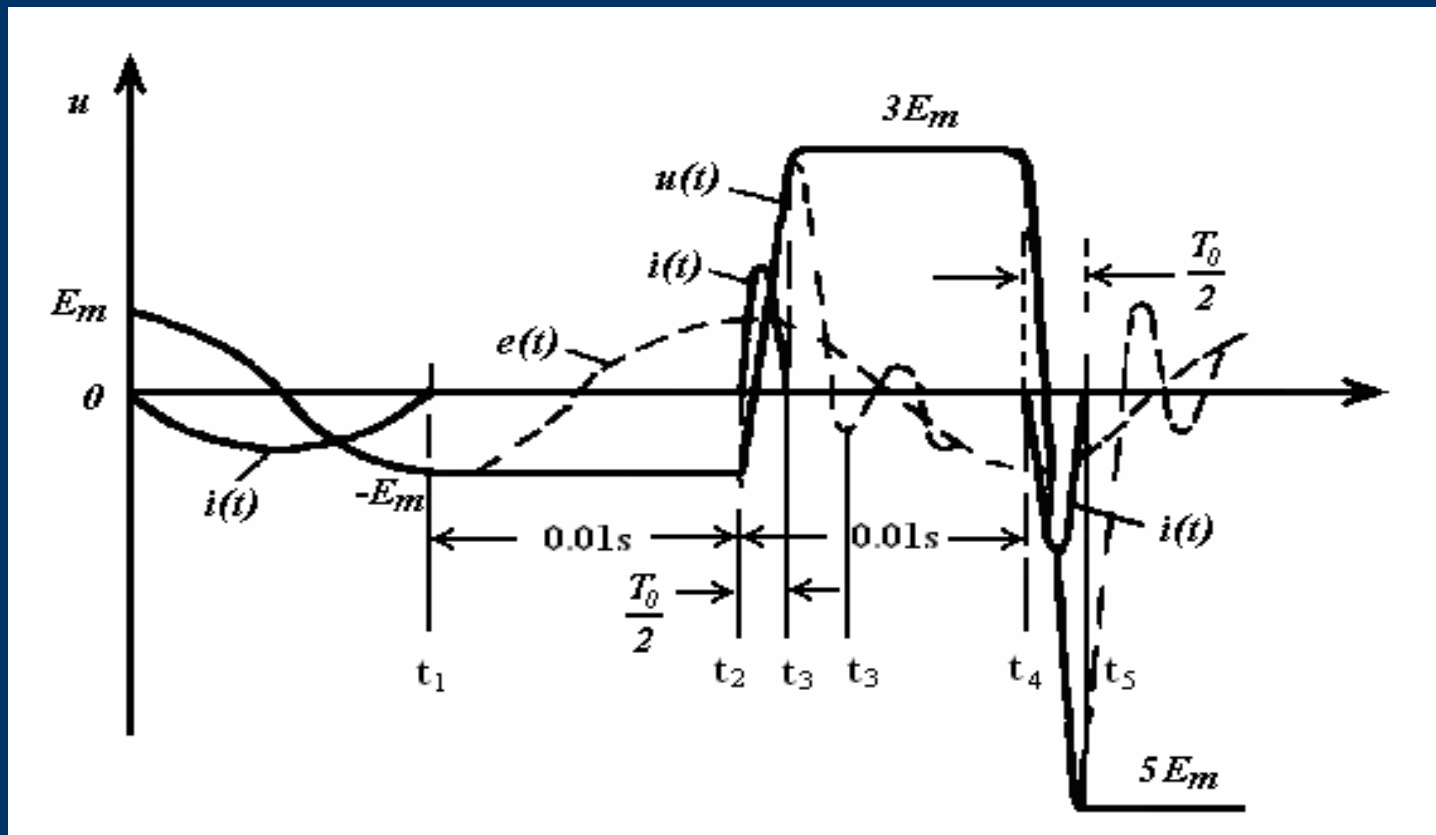
C_2 : 线路电容

$e(t)$: 电源电势

$$\frac{1}{\omega C} \gg \omega L$$

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

切空线过电压发展过程



切空线过电压发展过程

- 断路器的工频电流（容性电流），过零电弧熄灭，此时电容C上的电压为最大值

$$U_{cm} = E_m$$

- 不考虑线路上残余电荷泄漏，断路器触头间恢复电压 $U_r(t)$ 为

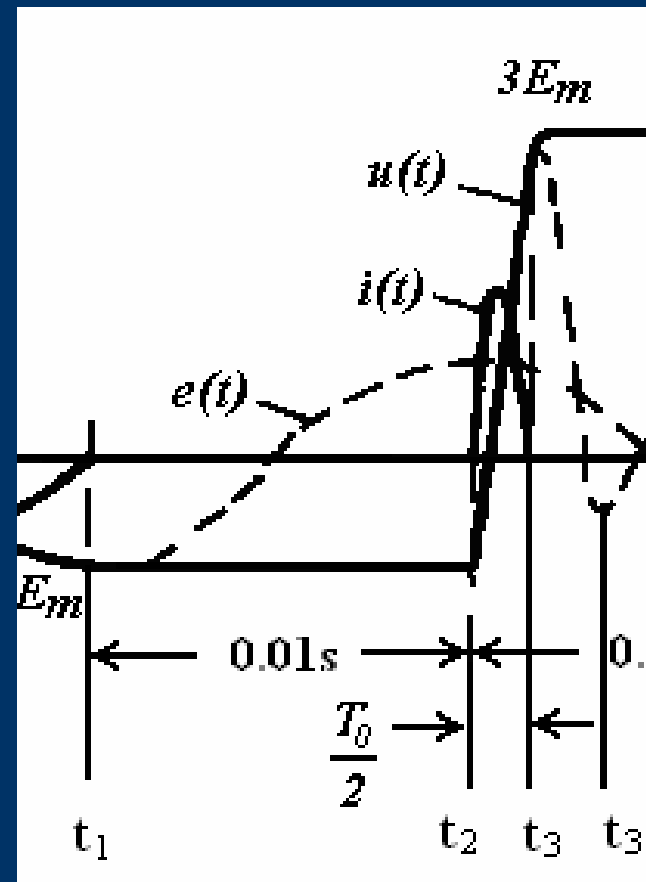
$$u_r(t) = e(t) - E_m = E_m [\cos(at + 90^\circ) - 1]$$

- 经过半个周期，恢复电压达到最大值（ $2E_m$ ）。如果断路器断口处**介质强度恢复**很快，电弧从此弧灭，分闸过程结束，不会产生过电压，**否则可能重燃**

切空线过电压发展过程

$$u_r(t) = e(t) - E_m = E_m [\cos(at + 90^\circ) - 1]$$

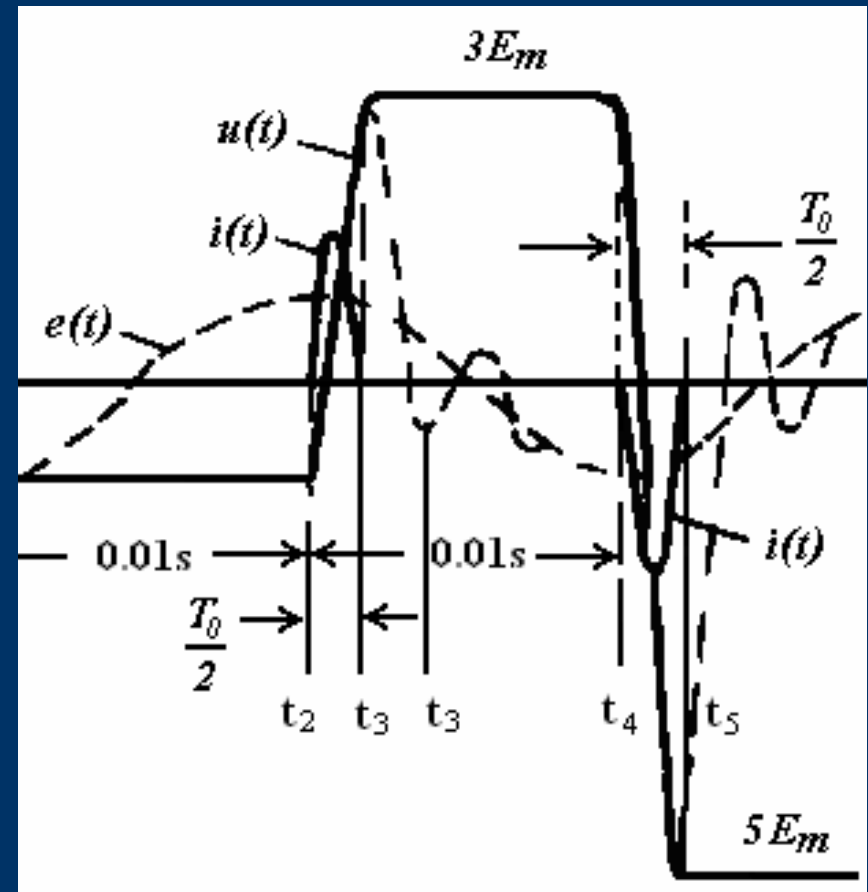
- 按最严重情况考虑：当恢复电压达 $2E_m$ 时重燃，是一个初始值为 $U_c(0) = -E_m$ 的重合闸过程，过电压达到 $3E_m$
- 重燃后，伴随高频振荡电压的出现，回路中流过容性的高频电流，当 U_c 达到 $-3E_m$ 时，高频容性电流恰好过零。电弧可能再次熄灭，电容 C 上将留有数值为 $3E_m$ 的残压



切空线过电压发展过程

$$u_r(t) = e(t) - E_m = E_m [\cos(at + 90^\circ) - 1]$$

- 再过半个周波，此时 $U_r(t)$ 达 $4E_m$ 。重燃后，过电压可达 $-5E_m$ ($-2E_m - 3E_m$)
- 依次类推，每隔半个工频周期就重燃一次和熄弧一次，过电压将按 $7E_m$, $-9E_m$ 逐次增加，直到触头间已有足够的绝缘强度，电弧不再重燃为止

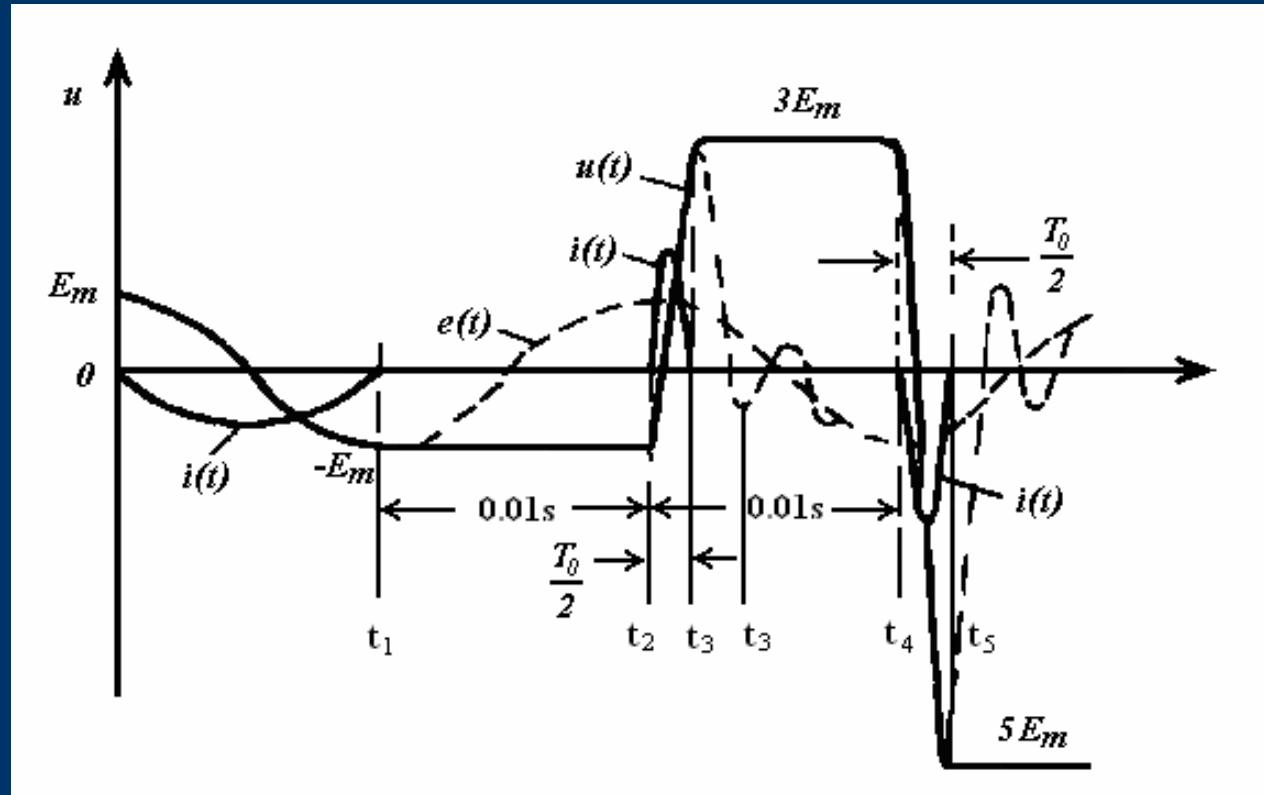


切空线过电压发展过程

$t_3 : 3E_m$

$t_4 : -E_m$

重燃时过电压最大： $5E_m$



t_1 : 第一次熄弧 t_2 : 第一次重燃

t_3 : 第二次熄弧 t_4 : 第二次重燃

t_5 : 第三次熄弧

第五节 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

■ 主要影响因素

➤ 断路器的性能

自能式断路器（如多油断路器和老式的少油断路器）开断小电流时，灭弧室压力低，熄弧后介质强度恢复慢，易发生多次重燃（6~7次）。

恢复电压低时重燃过电压低，但重燃次数多增加了高幅值过电压出现的可能性

■ 主要影响因素

➤ 断路器触头重燃、熄弧具有明显的随机性

分闸时，不一定每次都重燃，即使重燃也不一定在电源到达最大值并与线路残压极性相反时发生。如果重燃提前发生，振荡振幅和相应的过电压随之降低，当重燃在断弧后的1/4工频周期内产生，则不会引起过电压

熄弧不一定在高频电流第一次过零时发生，在第二次过零或更后的时间才被切断，线路上残余电压大大降低，断路器触头间的恢复电压和重燃过电压都大大减小

第五节 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

■ 限制措施

➤ 改进断路器结构

切除电容负载时产生过电压的根本原因是断路器的重燃，改进断路器结构，提高触头间介质强度的恢复速度，避免重燃，可从根本上消除这种过电压

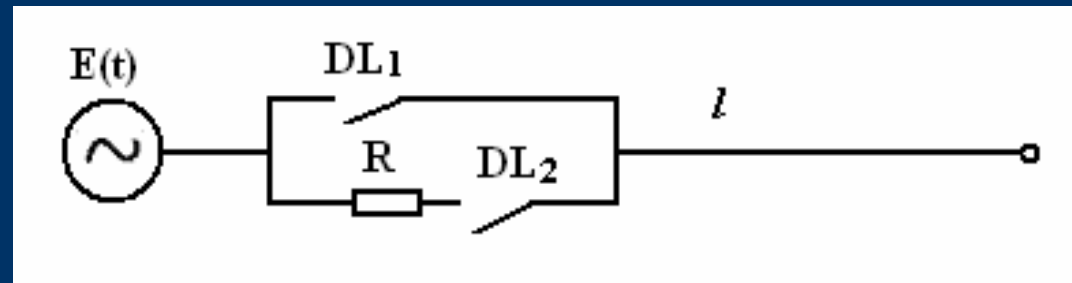
采用外能式方法灭弧（采用SF₆，压缩空气，带压油活塞的少油断路器），切除空载线时可做到不重燃，老式的少油断路器或多油断路器还存在重燃

第五节 内部过电压案例

-----切空线操作过电压

■ 限制措施

➤ 装分闸并联电阻



1. 先断主触头 DL_1 ，将 R 串入回路：一是泄放残余电荷，二是降低触头间电压，此过程希望 R 值小
2. 经 $1.5\sim 2$ 周波，再断开辅助触头 DL_2 ，此过程希望 R 大，电容上分压小，恢复电压小，不易重燃

➤ 装分闸并联电阻

例如，KW-330型空气断路器所装并联电阻R为 3000Ω

超高压少油断路器由于灭弧性能良好，考虑到少油断路器加并联电阻在结构上有困难，所以未装并联电阻

在110~220kV中性点直接接地的电网中，切空线过电压最大值($2.8U_{\text{phm}}$)是低于线路绝缘水平($3.0U_{\text{phm}}$)的，所以我国生产的110~220kV各种断路器一般不加并联电阻

■ 限制措施

➤ 氧化锌避雷器作为后备保护

要求在断路器并联电阻失灵或其他意外情况出现较高幅值的过电压时应能可靠动作，将过电压限制在允许范围内

氧化锌避雷器在限制操作过电压时具有以下特点：

1. 避雷器的操作波放电电压波形可能与工频放电电压不同，且分散性较大
2. 流过避雷器的电流一般小于雷电流，但持续时间长，对避雷器的通流容量要求严
3. 操作过电压作用下避雷器可能多次动作，**对阀片及间隙的要求苛刻**

Q & A

屠幼萍

80795842

typ@ncepu.edu.cn

华北电力大学电力系

北京102206