



欢迎来到高电压工程课
请进入雨课堂

清华大学电机系

2024春《高电压工程》第十五讲

梁曦东

2024-6-14



第10章 操作过电压与绝缘配合

本章的
教学要求？

掌握科学原理
了解技术措施
理解工程规范

科学问题：为什么？
技术问题：怎么办？
工程问题：哪个最优？

- 10.1 高压断路器的分合闸
- 10.2 空载线路合闸过电压
- 10.3 切除空载线路过电压
- 10.4 特快速瞬态过电压
- 10.5 操作过电压的限制措施
- 10.6 绝缘配合的基本概念与基本方法

本章核心概念：

操作过电压的倍数、断路器的分断与关合、重合闸、
空载线路合闸过电压、切除空载线路过电压、特快速瞬态过电压、
合闸电阻、绝缘配合、基本冲击绝缘水平BIL



第10章 操作过电压与绝缘配合

- | | |
|-----------------|---------------------|
| 10.1 高压断路器的分合闸 | 10.2 空载线路合闸过电压 |
| 10.3 切除空载线路过电压 | 10.4 特快速瞬态过电压 |
| 10.5 操作过电压的限制措施 | 10.6 绝缘配合的基本概念与基本方法 |

- 什么是操作过电压？不同的操作过电压都是怎么形成的？
- 某台断路器的分、合闸与电网中的操作过电压有什么关系？
- 内过电压与操作过电压有何异同？
- 不同电压等级的电网和电气设备面临的过电压威胁一样吗？
- 哪几种操作过电压对电网威胁更大？
- 电力系统为什么会设定允许的操作过电压倍数而不是幅值？
- 操作过电压的限制与防护措施有哪些？
- 什么叫绝缘配合？为什么需要绝缘配合？如何进行绝缘配合？

边学边想
加深理解

工程中很多代
价是为了应对
故障和意外

● 按过电压的时间快慢区分：

缓波前过电压 Slow-Front Over-voltage, SFO, 操作过电压

快波前过电压 Fast-Front Over-voltage, FFO, 雷电过电压

特快速瞬态过电压 Very Fast Transient Over-voltage, VFTO, 操作过电压

● 按过电压形成原因区分：

空载线路合闸（合空线）过电压，切除空载线路（切空线）过电压

切除空载变压器（切空变）过电压，感性电流截流过电压，

谐振过电压，弧光接地过电压，解列过电压

过电压的
各种划分

外过电压 (雷电过电压)	内过电压			
	工频电压升高 (暂时过电压)	谐振 过电压	弧光接地 过电压	操作过电压
雷击塔顶、 雷击导线、 雷击避雷线档 距中央、 雷击线路附近 地面	空载长线路容升 效应、不对称短 路、突然甩负荷 等引起，是操作 过电压振荡的基 础，绝缘配合必 须考虑	铁磁谐振压、 参数谐振过 电压(多出 现在配电系 统中)	中性点非 直接接地 系统单相 接地故障 引起	合空线过电压 (含重合闸过电压) 切空线过电压 切空变过电压 截流过电压 解列过电压 VFTO



绝缘配合允许的操作过电压

电压等级 / kV	非直接接地		直接接地				
	30 ~ 65 及以下	110~ 145	110~ 220	330	500	750	1000
允许的相对地 操作过电压倍数	4.0	3.5	3.0	2.75	2.0	1.8	1.7
允许的相间操作过电压为 相对地操作过电压的倍数	1.3 ~ 1.4			1.4 ~ 1.45	1.5		

以发生过电压处设备的
最高运行相电压峰值的
倍数表示操作过电压的
大小、高低

例如：500kV系统，绝缘配合允许的
相对地操作过电压幅值
 $2.0 \text{ p.u.} = (550 \times 1.414 / 1.732) \times 2.0 = 898 \text{ kV}$



操作过电压产生的核心是电路参数突然变化带来的电路中电磁能量在电容元件和电感元件之间的振荡。

电路参数发生突变的种种情况，从高压开关（断路器）的角度看，无非以下几种：

断路器切除、关合
哪几种电流时
过电压更高？

切除：容性小电流(切空线)、容性大电流(切电容器组)，

切除：感性小电流(切空载变压器、空载电动机)、
感性大电流(切故障电流)；

关合：容性小电流(合空线)、容性大电流(投电容器组)，

关合：感性小电流(合空变、空载电动机)、感性大电流。

过电压产生的核心是电路参数突然变化带来的电路中电磁能量在电容元件和电感元件之间的振荡。

电路参数发生突变的种种情况，从高压开关（断路器）的角度看，无非以下几种：

断路器切除、关合
哪几种电流时
过电压更高？

切除：容性小电流(切空线)、容性大电流(切电容器组)，

切除：感性小电流(切空载变压器、空载电动机)、
感性大电流(切故障电流)；

为什么切除、关合
小电流时过电压更高？

关合：容性小电流(合空线)、容性大电流(投电容器组)，

关合：感性小电流(合空变、空载电动机)、感性大电流。



10.1 高压断路器的分合闸

电力系统的各类切换操作由不同类型的高压开关来完成
高压开关的分类：

- **断路器**：能开断、关合故障时的大电流及正常的负荷电流
- **负荷开关**：仅能开断、关合正常的负荷电流
- **隔离开关**：闭合时能承载正常电流及规定的短路电流，不用来开断或关合电流，只在检修时隔离带电部分以保证工作人员的安全
- **接地开关**：对设备或被检修电路实现保护接地
- **接触器**：能开断、关合及承载正常电流，用于需要频繁操作及控制的场合



特高压SF₆断路器

六氟化硫断路器

产品型号	LW -1100/Y5000-50[G]	执行标准	GB1984-2003 IEC62271-100
额定电压	1100 kV	额定线路充电开断电流	1200 A
额定电流	5000 A	额定分合闸操作电压(DC)	220 V
额定雷电冲击耐受电压	2400 kV	辅助回路额定电压(DC)	220 V
额定操作冲击耐受电压	1800 kV	额定操作顺序	O-0.3s-CO-180s-CO
额定短路持续时间	2 s	灭弧室额定压力(20℃时)	0.58 MPa
额定短路开断电流	50 kA	气体质量	840 kg
额定峰值耐受电流	135 kA	总质量(含气体)	11500 kg
出厂日期	2008 年 10 月	出厂编号	001

XD 西安西开高压电气股份有限公司
XIAN SHIKY HIGH VOLTAGE ELECTRIC CO.,LTD.



2009/03/30

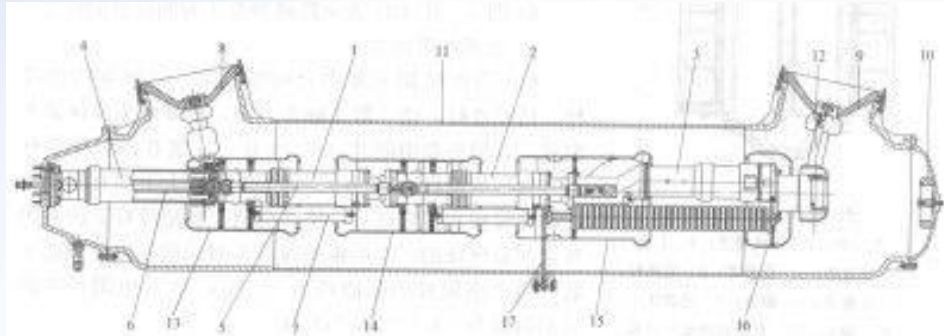
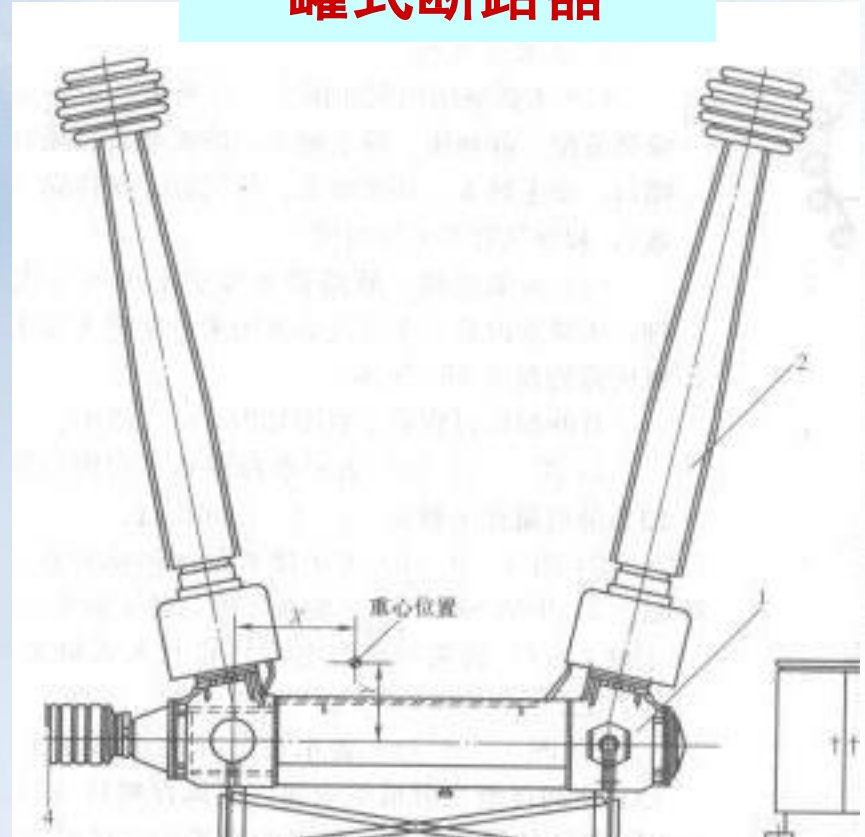


柱式断路器



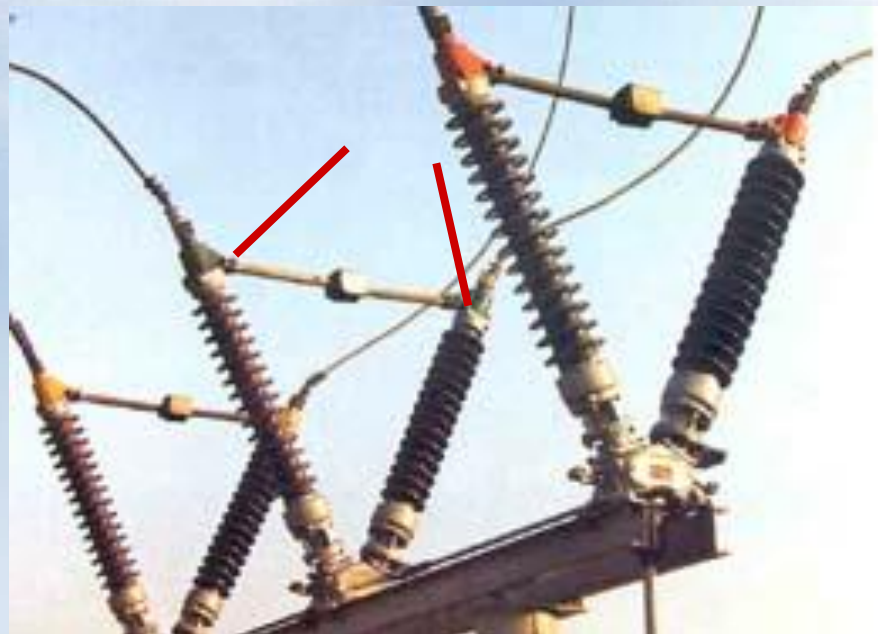
罐式断路器

罐式断路器





不能灭弧的隔离开关，打开时成为明显可见断开点



不能灭弧的隔离开关
打开时成为明显可见断开点

在开断或关合大电流时，**灭弧是高压断路器的重要能力。**

按**灭弧介质与灭弧方式**，高压断路器分为油断路器、六氟化硫断路器、真空断路器等几类。

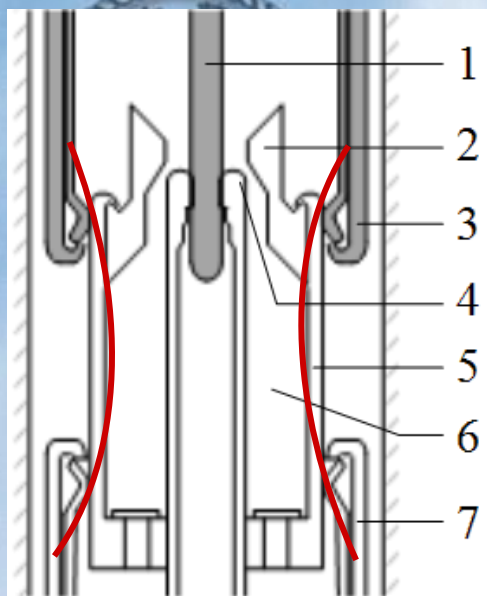
真空断路器：多用于35kV及以下的电压等级，各国正开发更高电压等级的真空断路器

油断路器：多用于35kV-220kV电压等级（油断路器由于有油，易燃。多油断路器早已停止生产，改用少油断路器）

SF₆断路器：多用于220kV及以上的电压等级。各国正积极研究SF₆的替代气体，争取少用或不用SF₆。（见教材2.5.7）

断路器合闸、**关合(close)→导通**

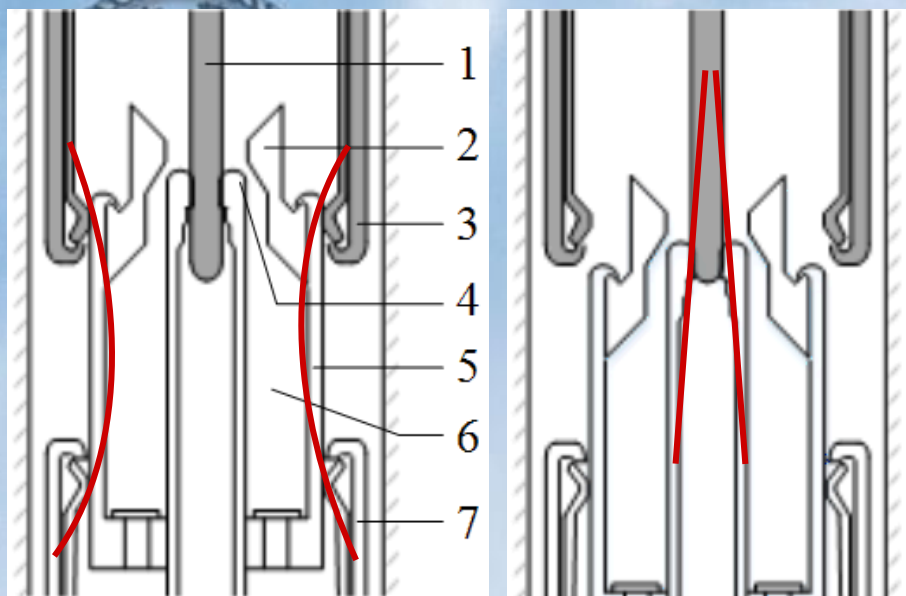
断路器分闸、**开断(open)→不导通**



合闸位置

断路器分闸及电弧产生与熄灭过程示意图

- 合闸时电流主要从主触头5和3之间流过；



合闸位置

主触头脱离接触

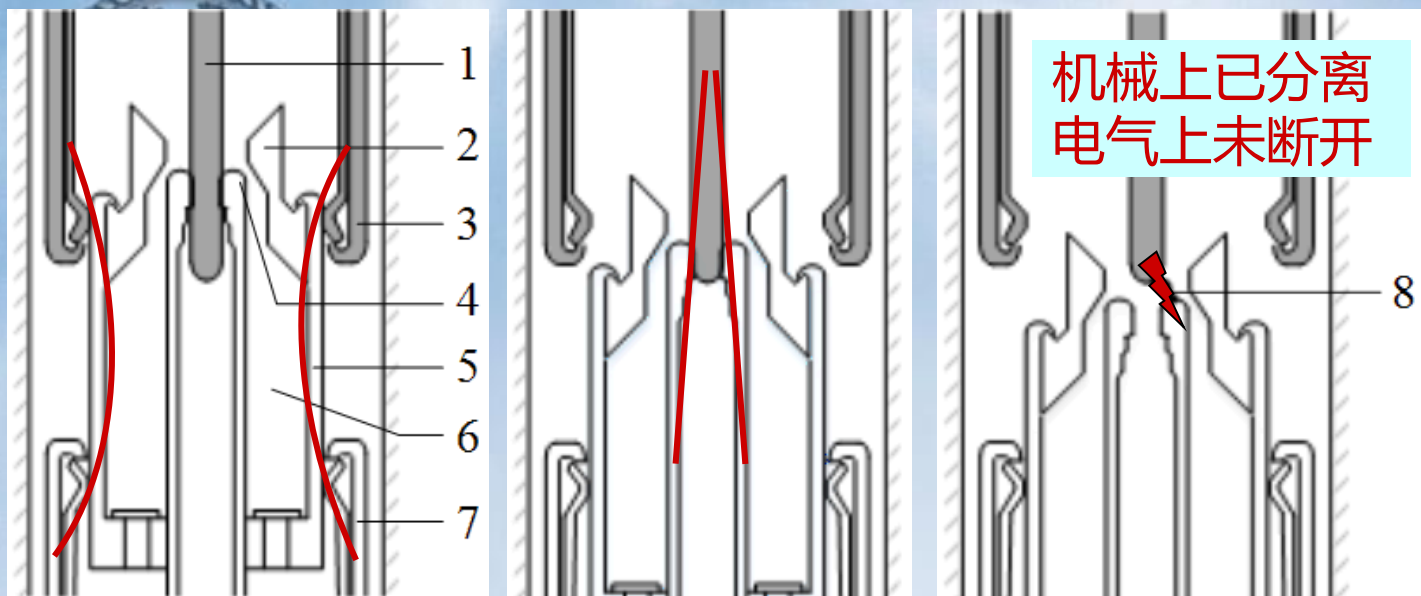
断路器分闸及电弧产生与熄灭过程示意图

- 合闸时电流主要从主触头5和3之间流过；
- 开始分闸时，5逐渐与3脱离接触，电流改为从弧触头4和1之间流过；

静弧触头

动弧触头





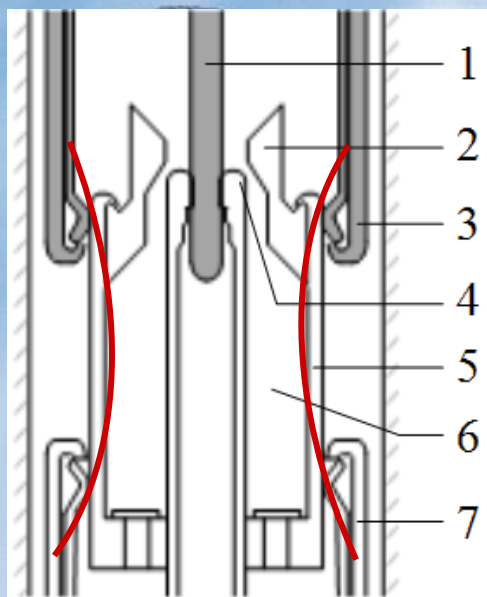
合闸位置

主触头脱离接触

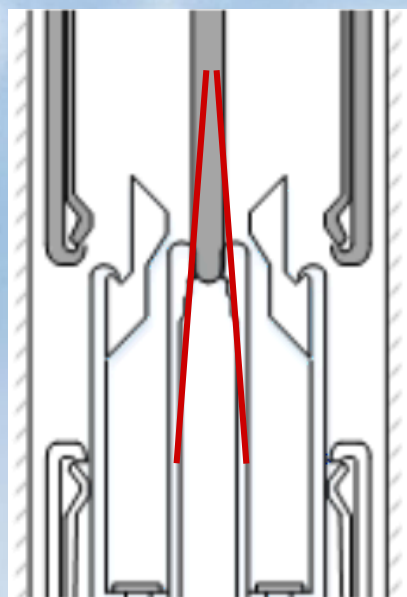
弧触头脱离接触
电弧产生

断路器分闸及电弧产生与熄灭过程示意图

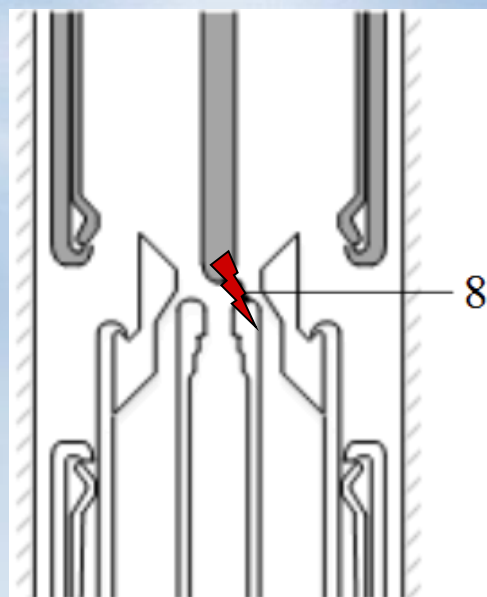
- 合闸时电流主要从主触头5和3之间流过；
- 开始分闸时，5逐渐与3脱离接触，电流改为从弧触头4和1之间流过；
- 4继续向下，4和1刚脱离接触时，两者距离很小，若电流突然熄灭，会在两者间产生恢复过电压，将间隙击穿，产生电弧8；同时SF₆从4中心向上喷出



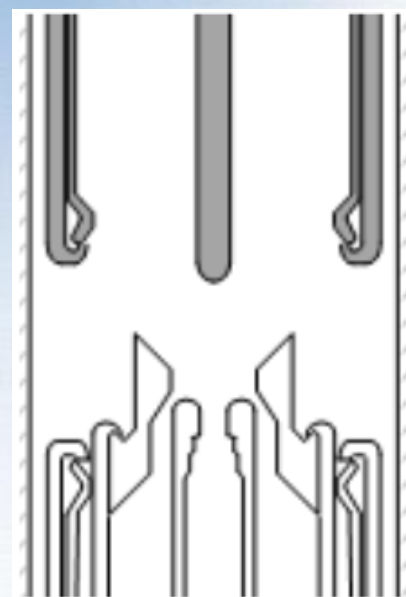
合闸位置



主触头脱离接触



弧触头脱离接触
电弧产生

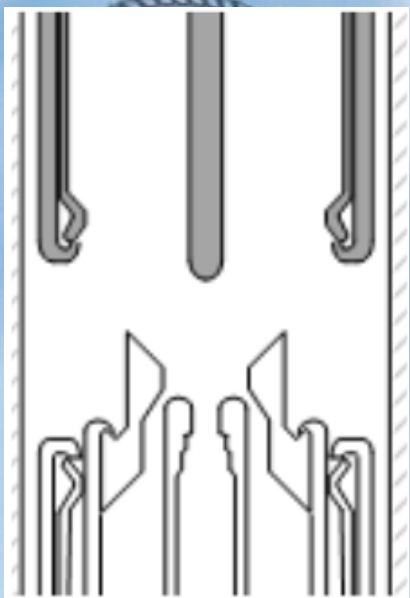


电弧熄灭
电路断开

断路器分闸及电弧产生与熄灭过程示意图

- 合闸时电流主要从5和3之间流过；
- 开始分闸时，5逐渐与3脱离接触，电流改为从4和1之间流过；
- 4继续向下，4和1刚脱离接触时，两者距离很小，若电流突然熄灭，会在两者间产生恢复过电压，将间隙击穿，产生电弧8；同时SF₆从4中心向上喷出
- 当4继续向下，触头间距离加大，电弧电流在某次过零熄灭时，触头间绝缘强度已经足够高，电流过零后的电弧无法继续维持燃烧，电弧彻底熄灭，电路彻底断开，开断过程结束。

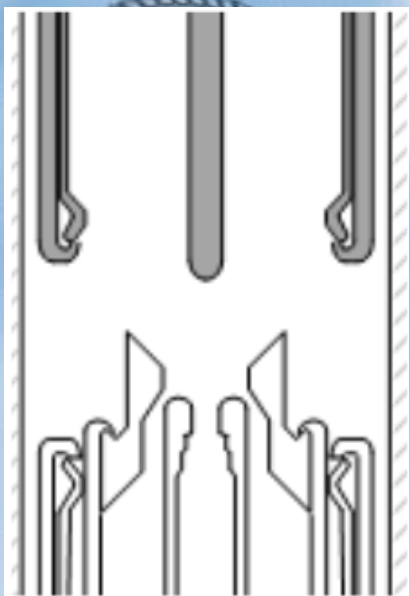
断路器的灭弧能力很重要！目前最大63kA



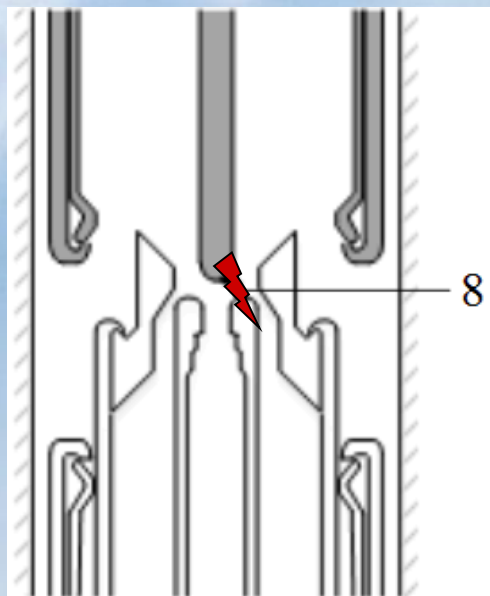
分闸位置
电路断开

断路器合闸及电弧产生与熄灭过程示意图

- 合闸过程，触头先是分开状态，触头间承受较高的电压；



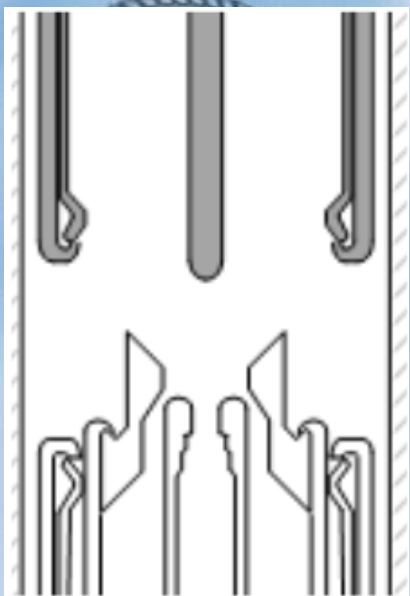
分闸位置
电路断开



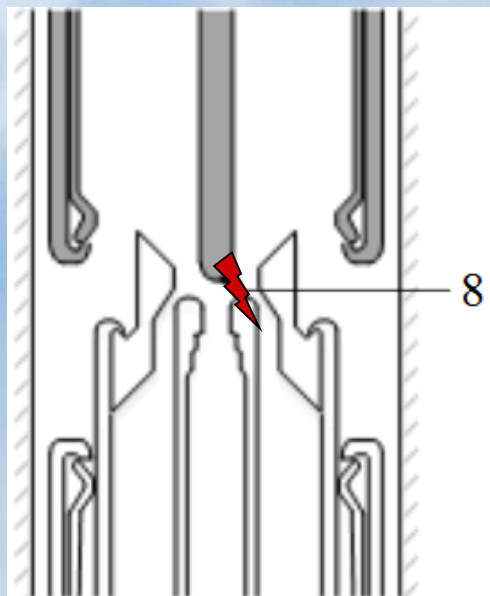
弧触头间产生电弧
机械上未连接
电气上已导通

断路器合闸及电弧产生与熄灭过程示意图

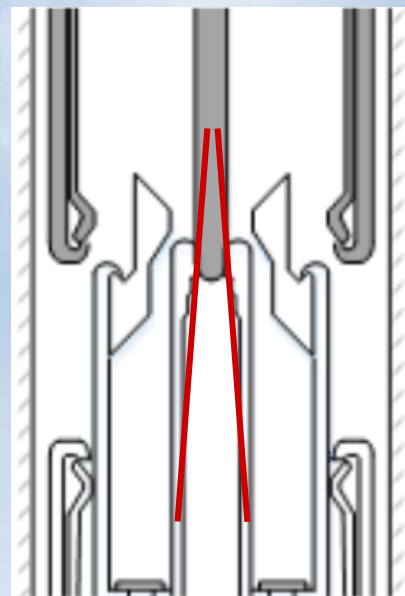
- 合闸过程，触头先是分开状态，触头间承受较高的电压；
- 接到合闸指令，动触头向上运动，触头间绝缘强度不断降低。而两触头之间始终有交变的电位差，当此电位差在某次峰值左右时，间隙被击穿，产生电弧8，这个现象被称为预击穿；



分闸位置
电路断开



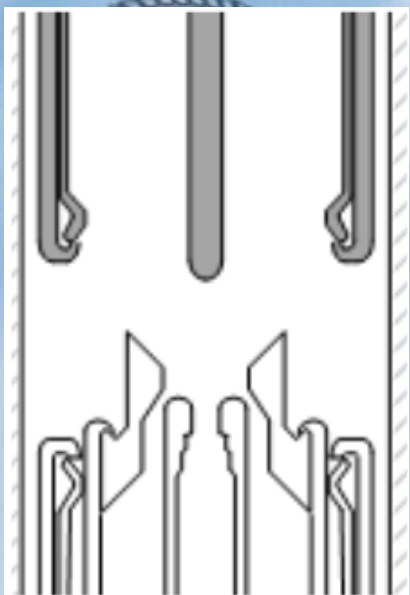
弧触头间产生电弧



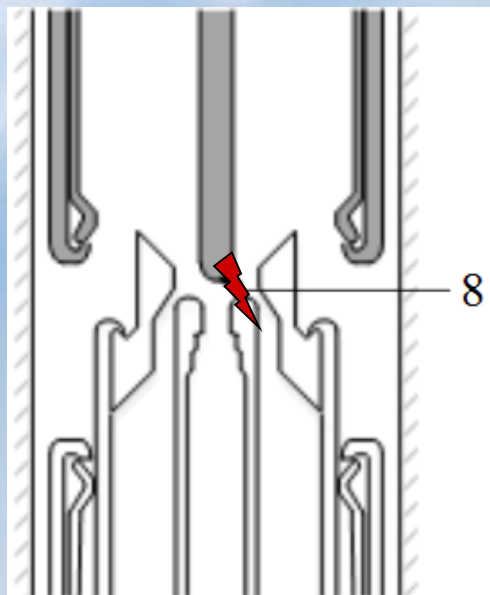
弧触头接触
电弧熄灭，电流
通过弧触头流通

断路器合闸及电弧产生与熄灭过程示意图

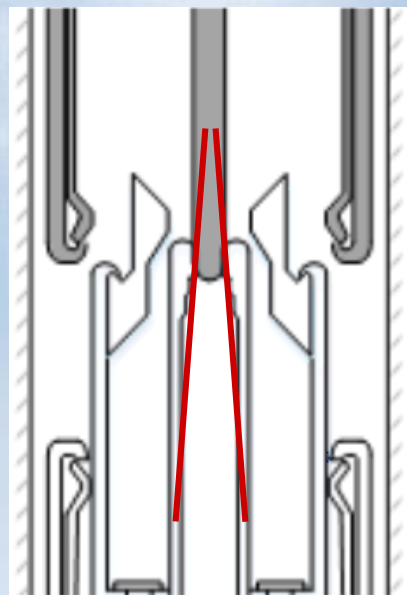
- 合闸过程，触头先是分开状态，触头间承受较高的电压；
- 接到合闸指令，动触头向上运动，触头间绝缘强度不断降低。而两触头之间始终有交变的电位差，当此电位差在某次峰值左右时，间隙被击穿，产生电弧8，这个现象被称为**预击穿**；
- 动触头继续向上运动，两触头紧密接触，电弧随之熄灭，**电路彻底接通**；



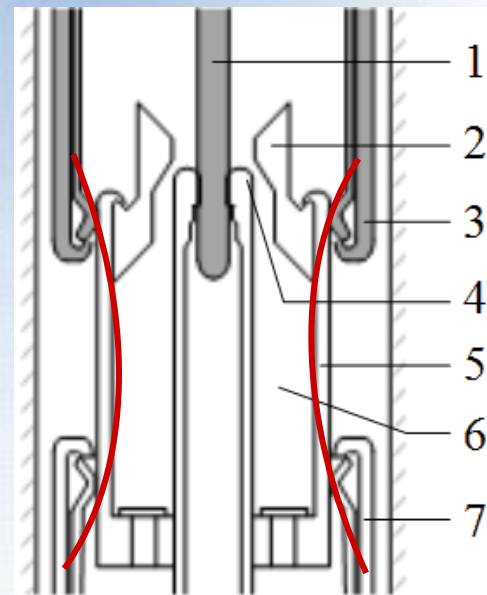
分闸位置
电路断开



弧触头间产生电弧



弧触头接触
电弧熄灭，电流
通过弧触头流通



主触头接触，
电流通过主触
头正常通流

断路器合闸及电弧产生与熄灭过程示意图

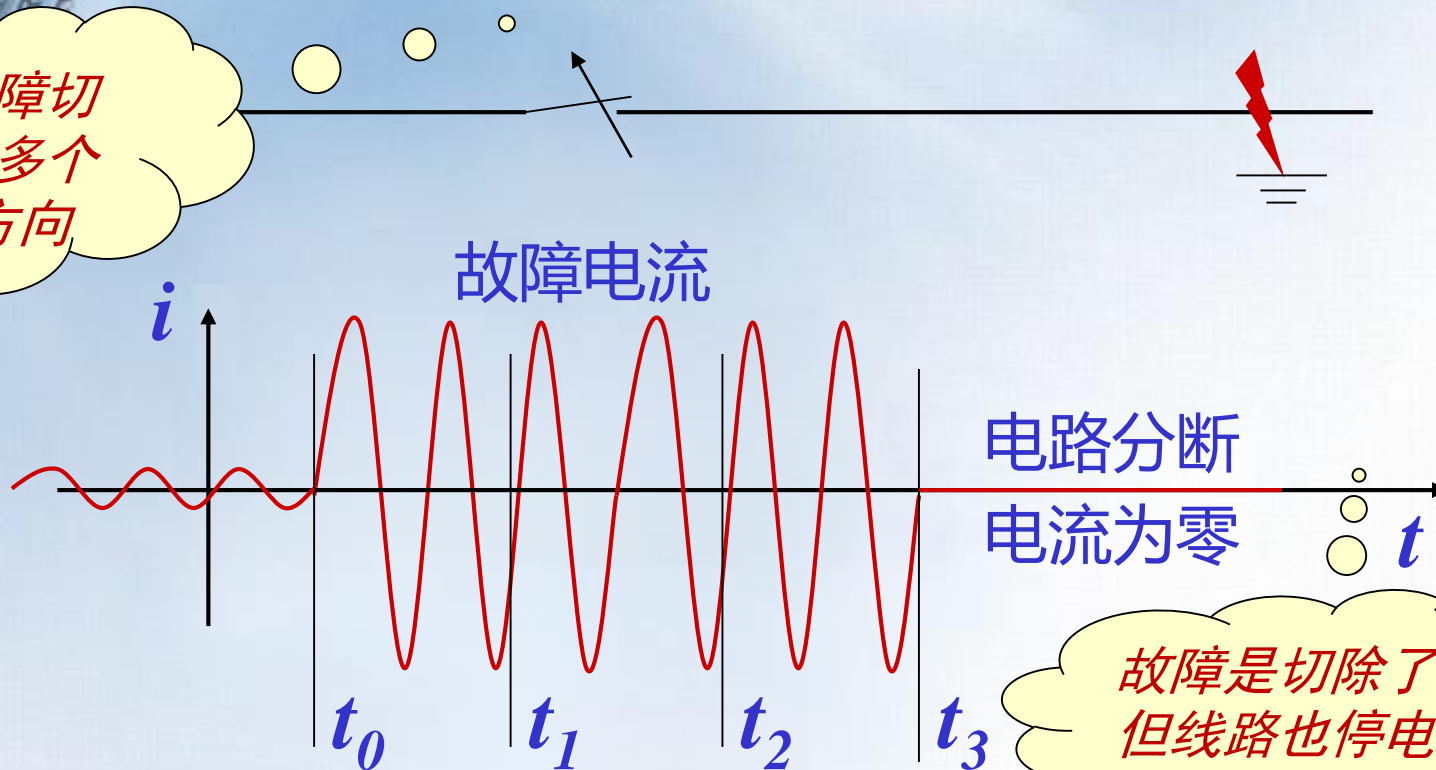
- 合闸过程，触头先是分开状态，触头间承受较高的电压；
- 接到合闸指令，动触头向上运动，触头间绝缘强度不断降低。而两触头之间始终有交变的电位差，当此电位差在某次峰值左右时，间隙被击穿，产生电弧8，这个现象被称为**预击穿**；
- 动触头继续向上运动，两触头紧密接触，电弧随之熄灭，**电路彻底接通**；
- 动触头继续向上，电流从5和1间流通，**合闸过程结束**。



断路器开断短路故障的基本过程

一次故障切除涉及多个专业方向

正常工作电流



故障是切除了，
但线路也停电了

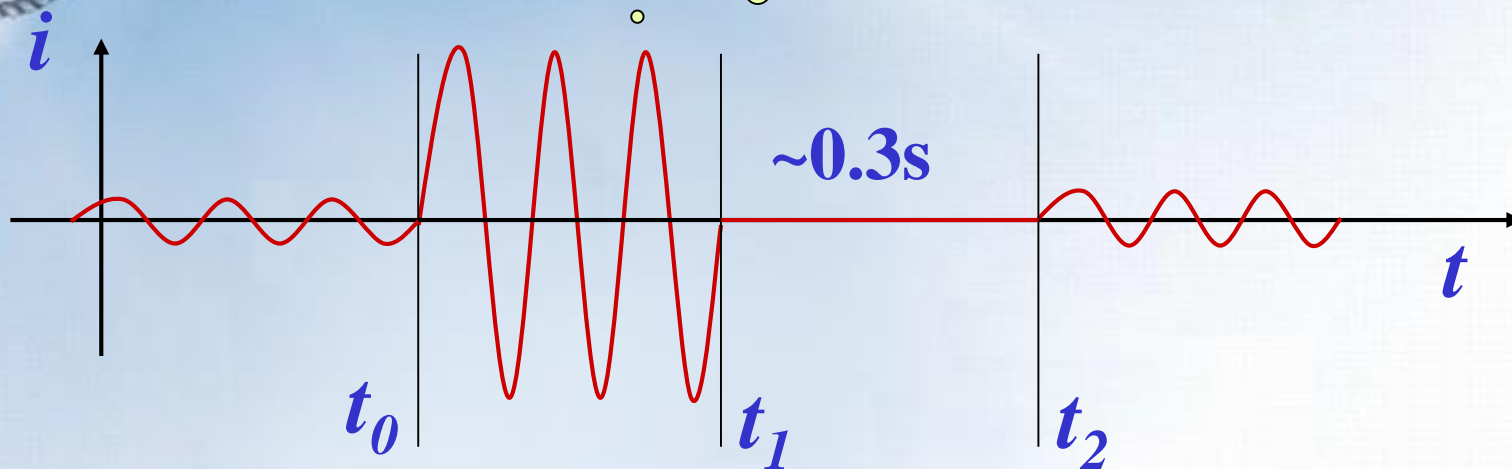
t_0 发生短路； t_1 断路器接到分闸命令； t_2 触头开始分离；

t_3 触头间电流过零时电弧熄灭，分闸成功

断路器的灭弧能力很重要！目前最大63kA

断路器的自动重合闸（重合成功）

试想：避雷器迅速
切断工频续流……

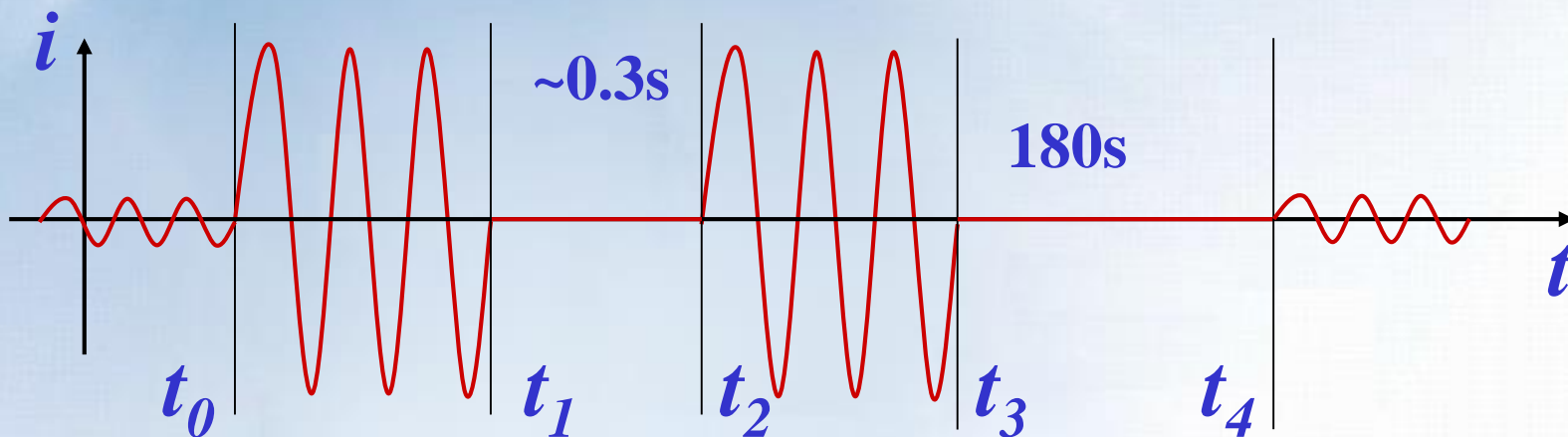


t_0 发生短路； t_1 断路器熄弧；约0.3秒后 t_2 自动重新合闸，若故障消失，则恢复正常工作电流，重合闸成功。

为避免各种瞬间故障就停电，
自动重合闸是必须的



断路器的自动重合闸 (重合不成，但强送成功)



t_0 发生短路； t_1 断路器熄弧；约0.3秒后 t_2 自动重新合闸，若故障仍在，重合不成，只能再次分闸； t_3 再次分闸熄弧。180秒后 t_4 强送，若故障消失，强送成功，线路恢复正常。

- 强送时若仍有故障，则再次分闸，不再重合。判为永久性故障，立即查找故障点、尽快检修。

过电压产生的核心是电路参数突然变化带来的电路中电磁能量在电容元件和电感元件之间的振荡。

电路参数发生突变的种种情况，从高压开关（断路器）的角度看，无非以下几种：

	容性负载		感性负载	
分断	容性小电流 (切空线)	容性大电流	感性小电流	感性大电流
关合	容性小电流 (合空线)	容性大电流	感性小电流	感性大电流
	如空载线路	如电容器组	如空载变压器 空载电动机	如故障电流

分、合容性小电流时过电压怎么产生的？
与上节断路器分合闸有什么关系？



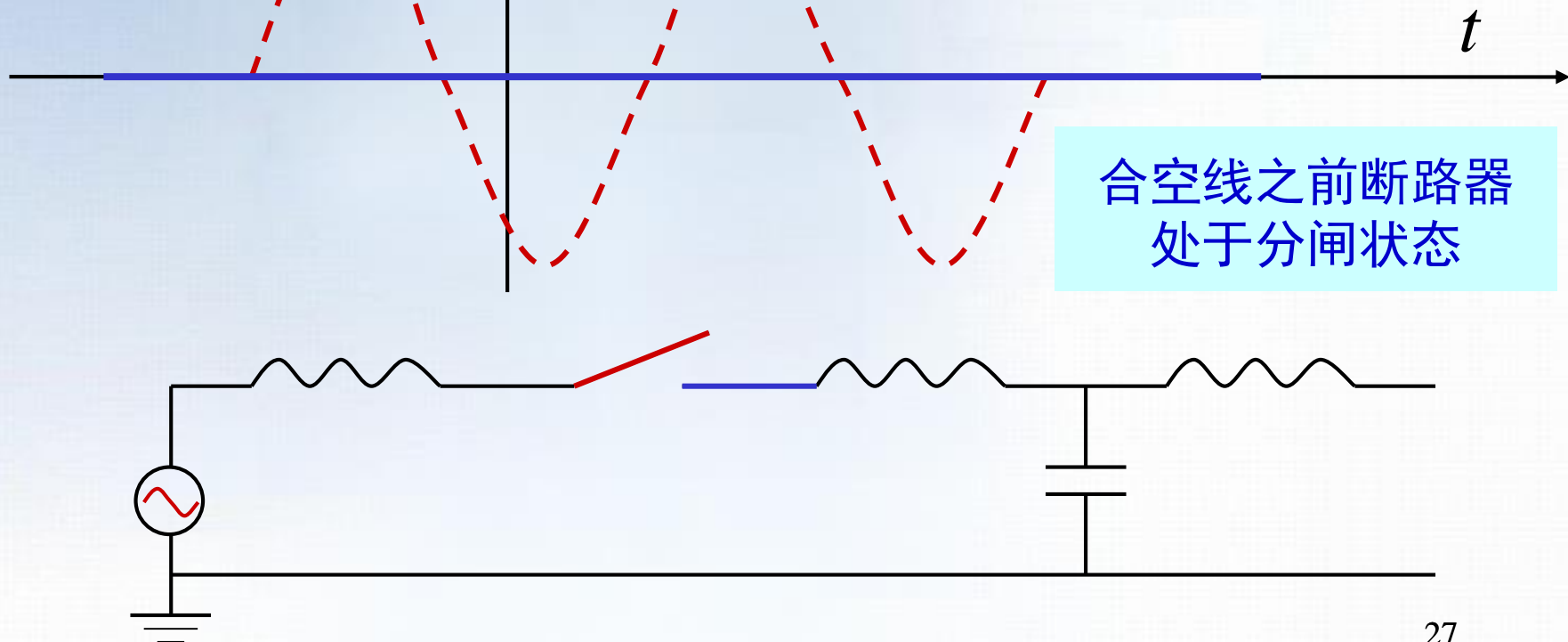
10.2 空载线路合闸(合空线)过电压

红：电源侧电压
蓝：线路侧电压

u

空载线路末端无负载，可用线路对地电容和线路电感组成的T型等值电路代表

合空线之前断路器处于分闸状态





10.2 空载线路合闸(合空线)过电压

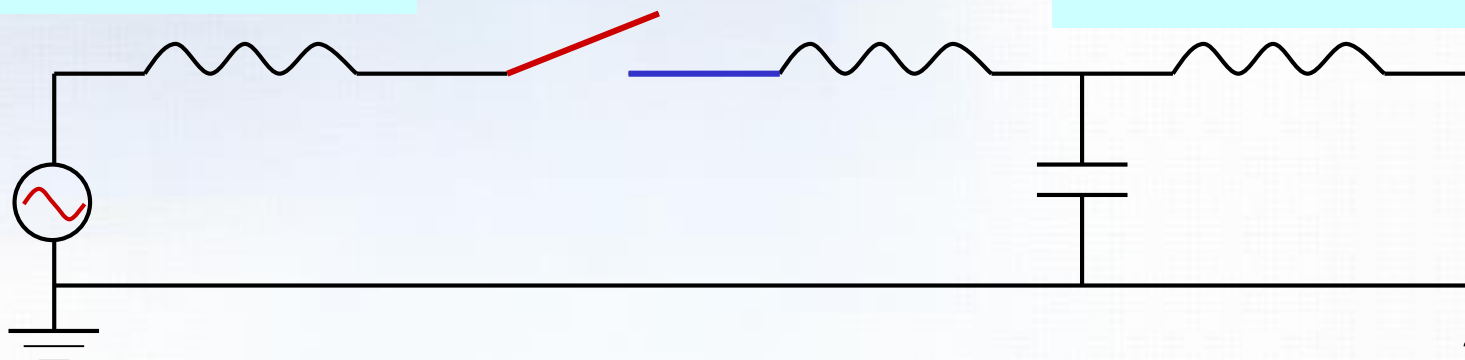
红：电源侧电压
蓝：线路侧电压

u

动静触头靠近到某时刻且电源电压为峰值时，触头之间的间隙击穿，产生合空线过电压。

电源与线路电压差
即为触头两侧电压差

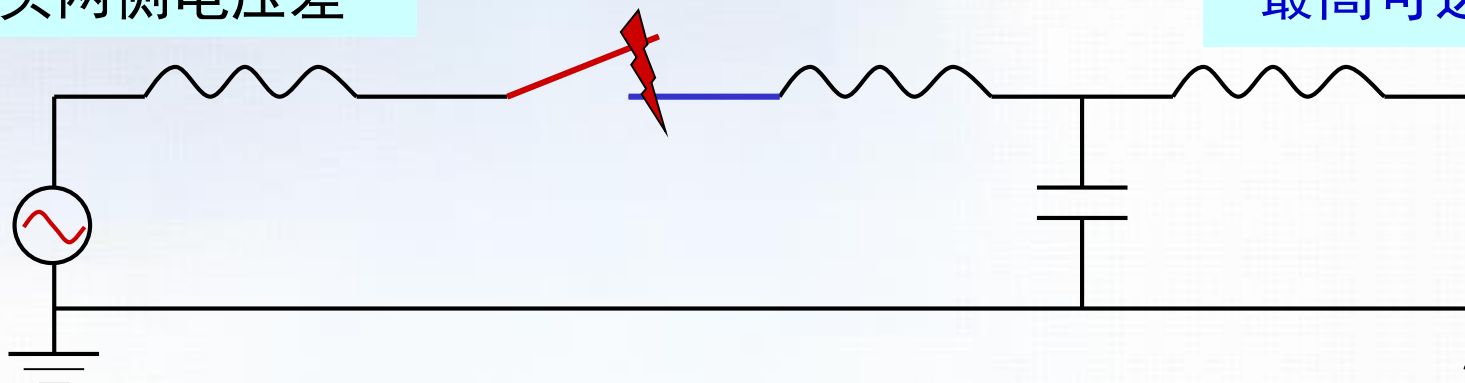
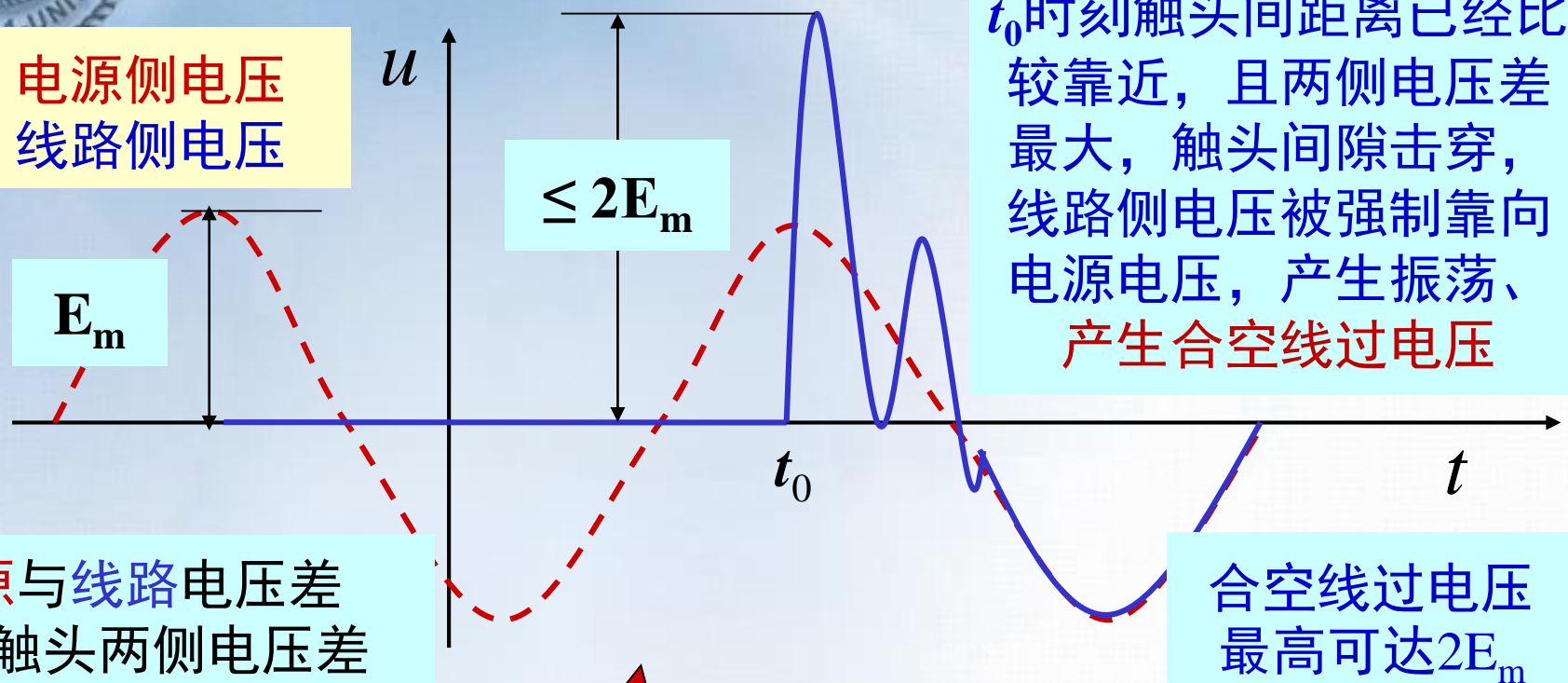
电源侧电压达峰值时
断路器触头两侧
电压差最大



有载线路合闸过电压
会更高还是更低？

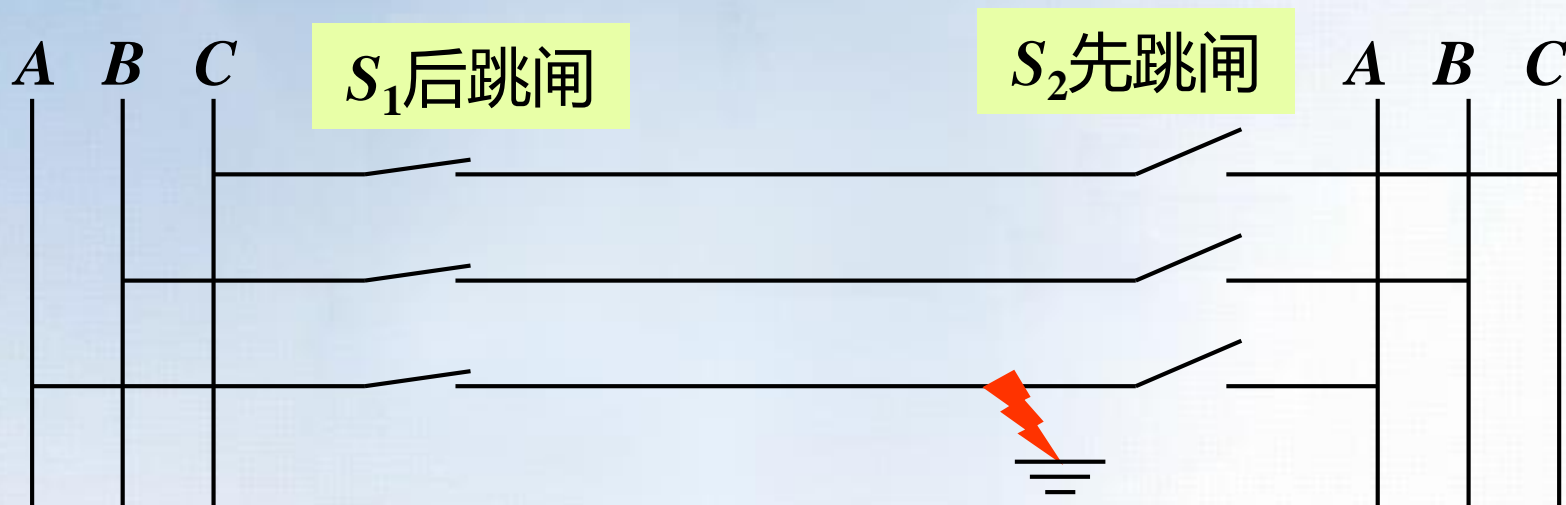
10.2 空载线路合闸(合空线)过电压

红：电源侧电压
蓝：线路侧电压



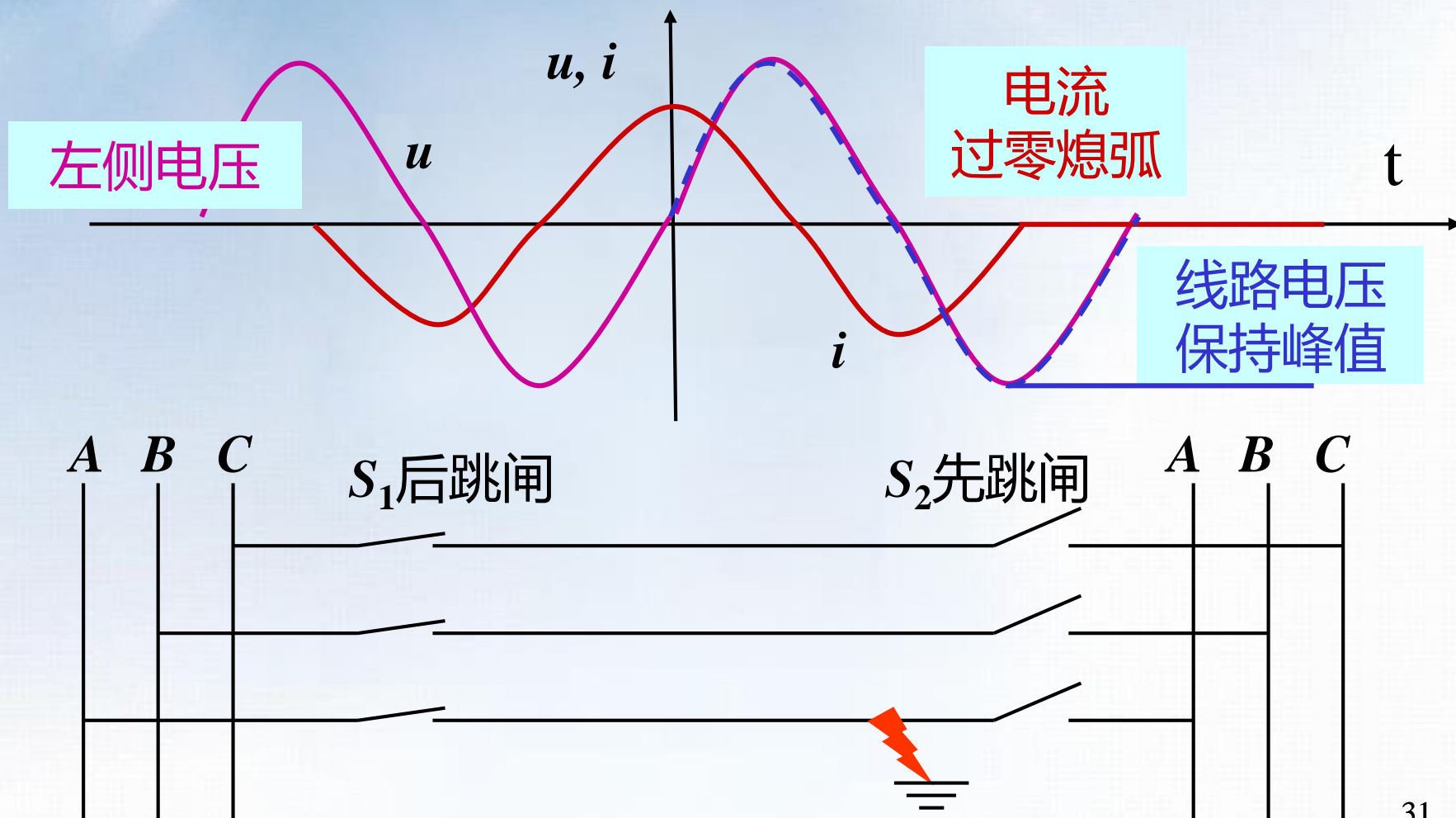
三相自动重合闸产生的重合闸过电压

基本情况： A相对地闪络，需两侧线路均跳闸，切断两侧电源，方能熄灭接地点的故障电弧。故障消失后两侧再分别自动重合闸，恢复送电（输电线路很多接地故障是由雷击等引发的瞬时故障）。



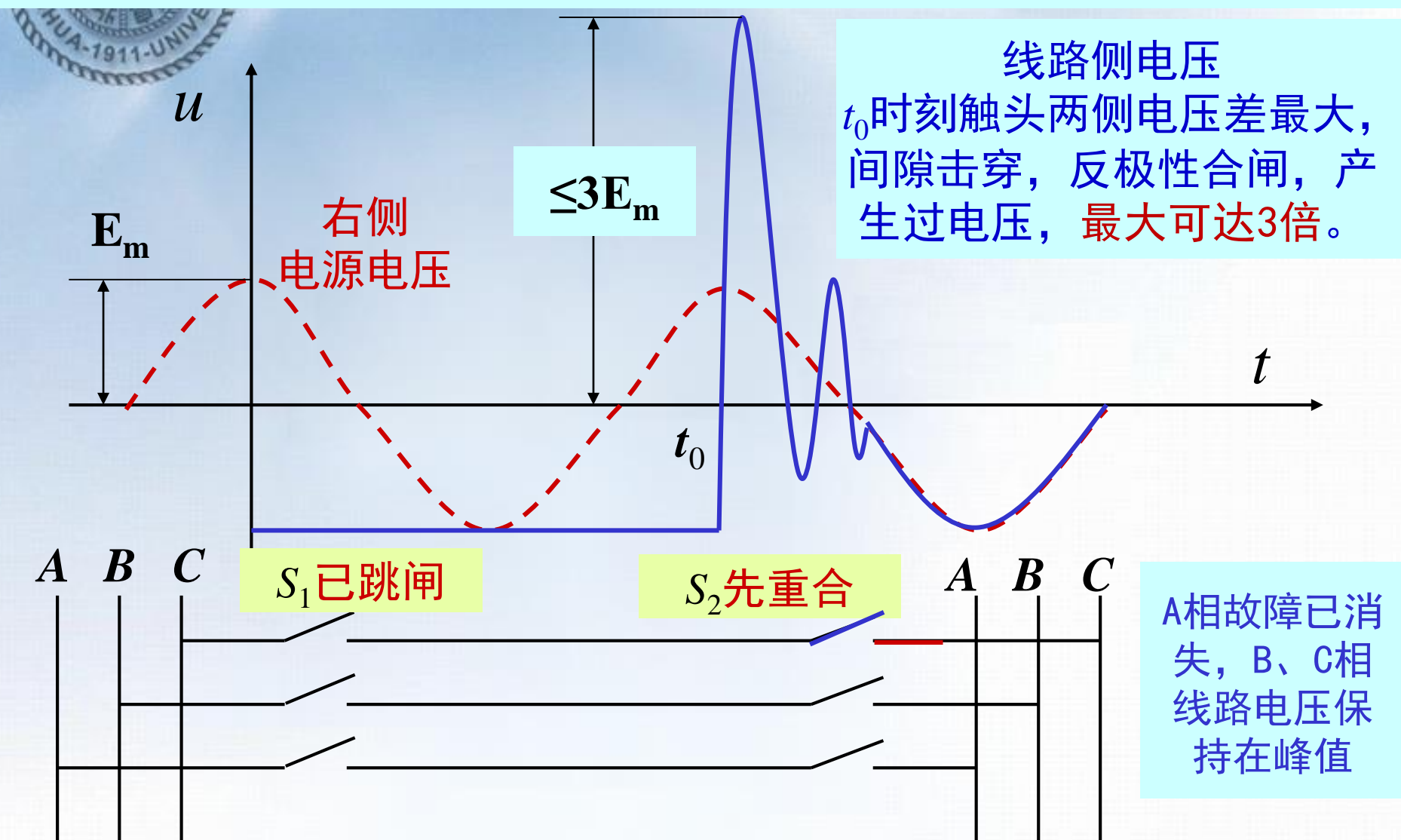
过程： A相某处对地闪络，近端 S_2 先检测到故障信号，先跳闸；
远端 S_1 跳闸时健全相B、C切断的是空载线路，是容性电流。

过程： A相某处对地闪络，近端 S_2 先检测到故障信号，先跳闸；远端 S_1 跳闸时健全相B、C切断的是空载线路，是容性电流。断路器 S_1 电流过零熄弧，但容性电压落后电流 90° ，于是 S_1 跳闸后B、C相线路残留在了峰值电压。于是 S_2 重合时，B、C相出现重合闸过电压



三相自动重合闸产生的重合闸过电压

S_2 先跳闸先重合，B、C相线路残留有峰值电压， S_2 重合为反极性合闸

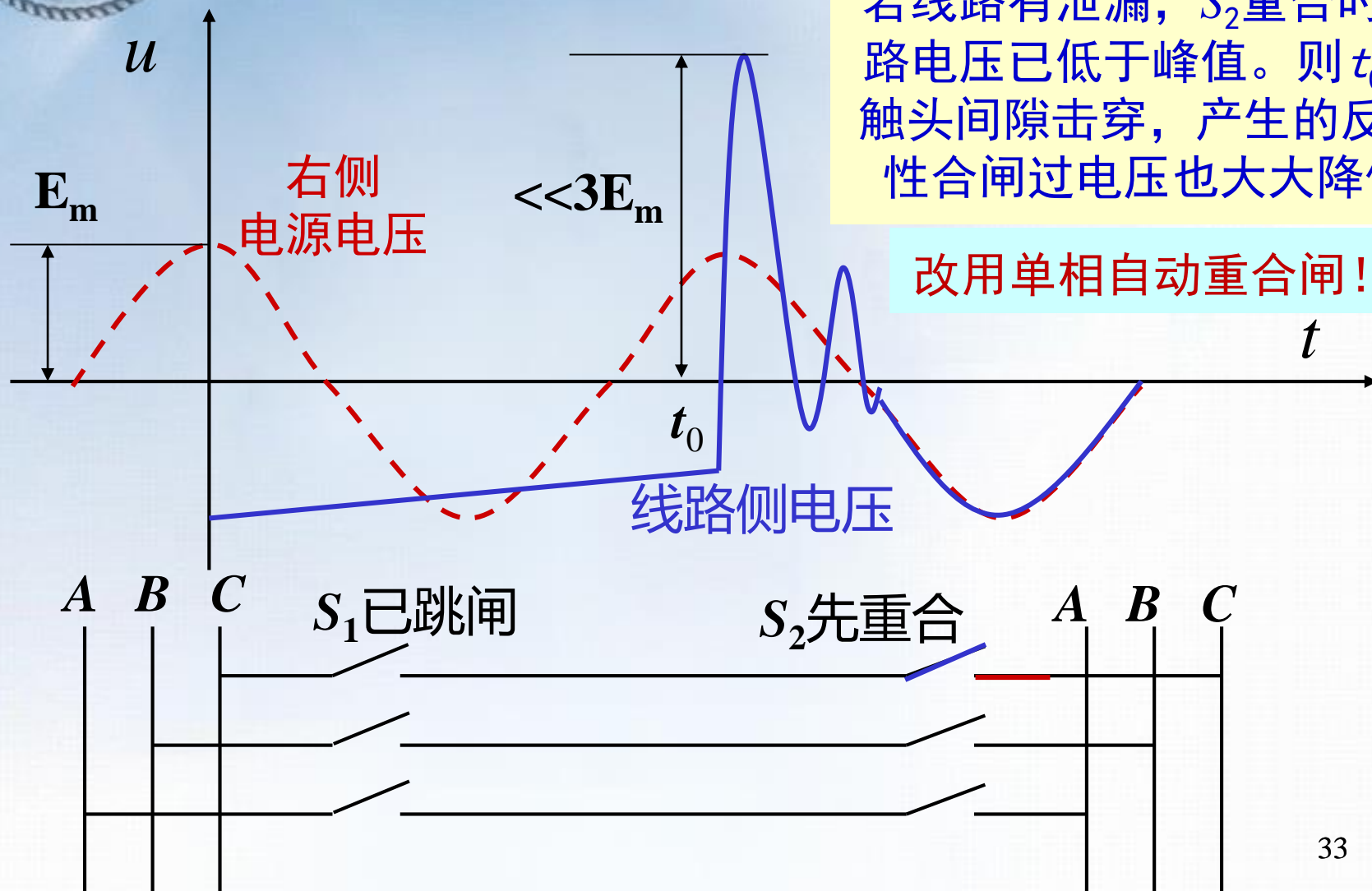


三相自动重合闸产生的重合闸过电压

S_2 先跳闸先重合，B、C相线路残留有峰值电压， S_2 重合为反极性合闸

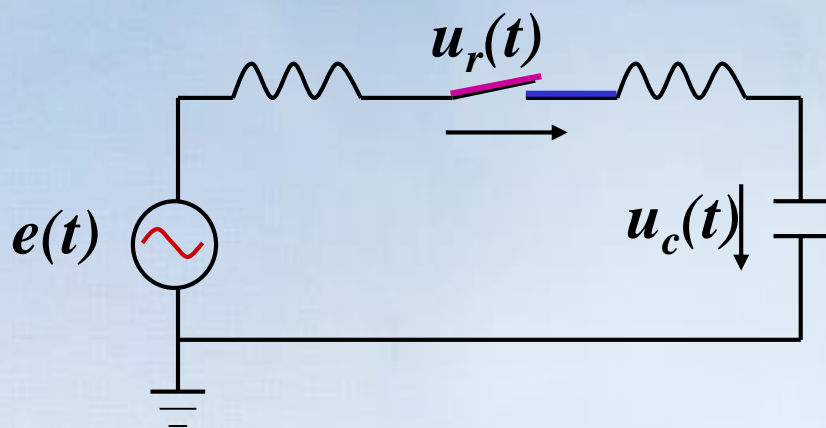
若线路有泄漏， S_2 重合时线路电压已低于峰值。则 t_0 时触头间隙击穿，产生的反极性合闸过电压也大大降低

改用单相自动重合闸！





10.3 切除空载线路过电压



红：电源侧电压
蓝：线路侧电压

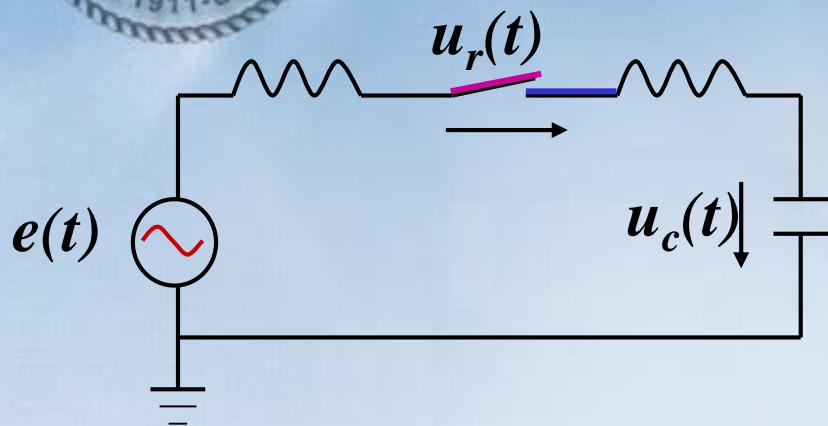
空载线路末端无负载，可用线路对地电容和线路电感组成的T型等值电路代表(略去右侧电感)

空载线路的电流为容性电流，电流领先电压 90° 。

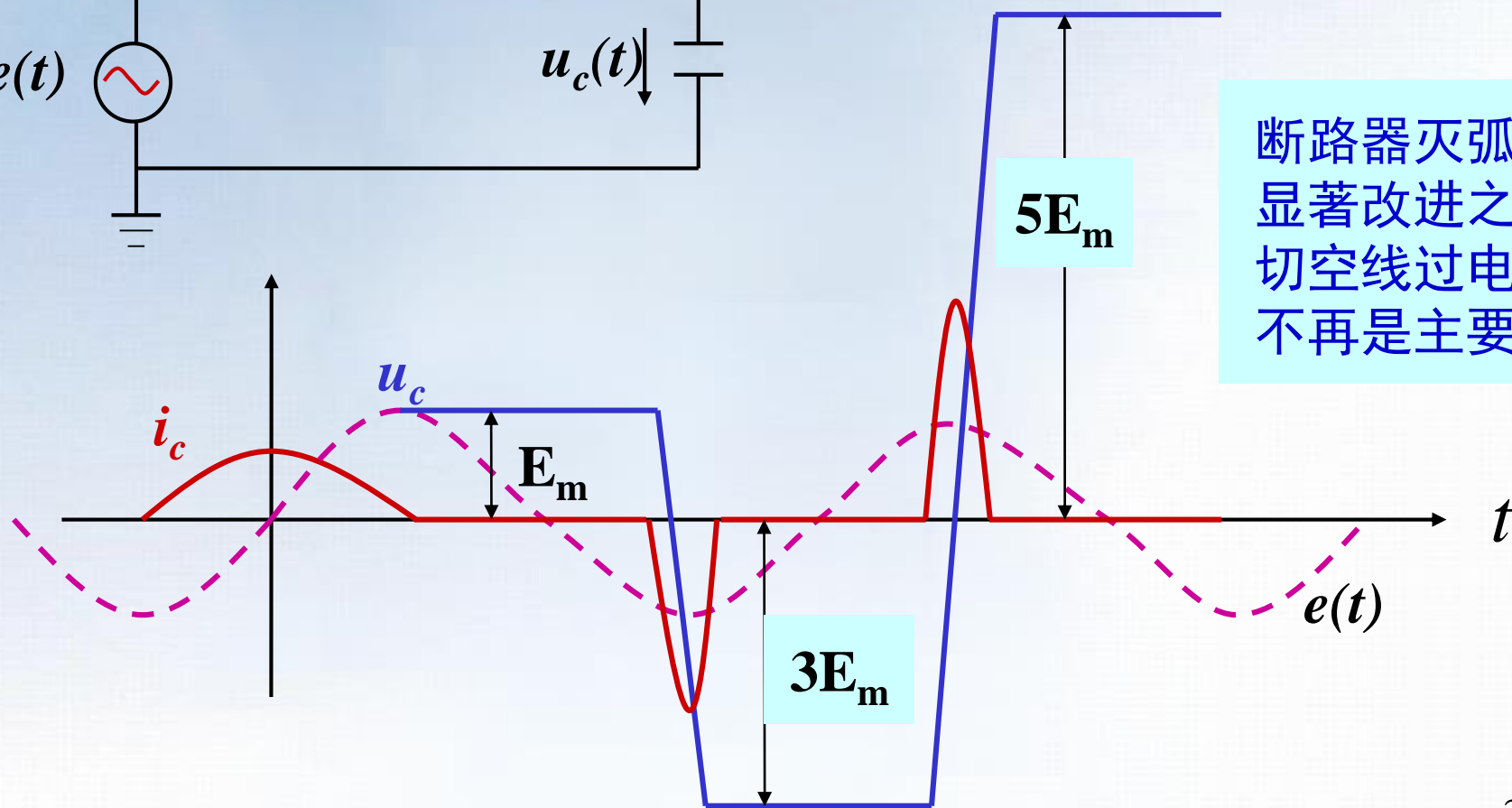
切空线之前断路器处于合闸状态
触头一旦打开，触头间恢复电压
 u_r 为电源电压与线路电压之差



10.3 切除空载线路过电压



触头一旦打开，触头间恢复电压 u_r 为电源电压与线路电压之差



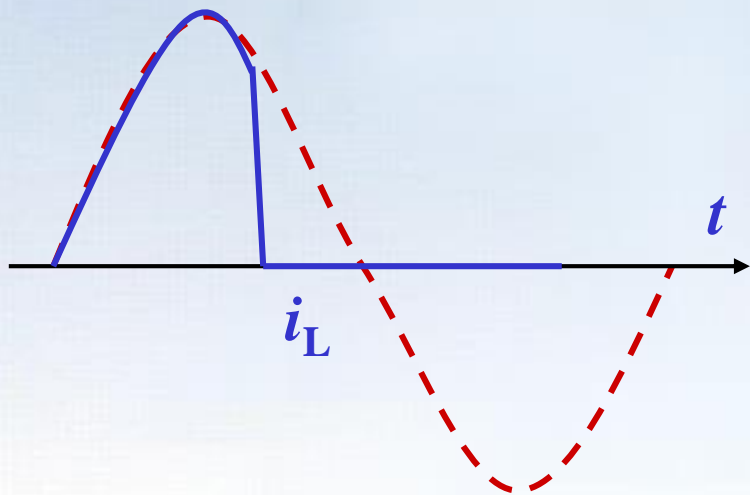
断路器灭弧性能显著改进之后，切空线过电压已不再是主要威胁

以上切空线、合空线是切、合容性小电流，表现为过电压

投入电容器组时，还有容性大电流的合闸涌流问题，表现为过电流

切除空载变压器时，也是切除感性小电流，表现为过电压

用真空断路器切除空载感应电动机时，是切除感性小电流，表现为截流过电压。

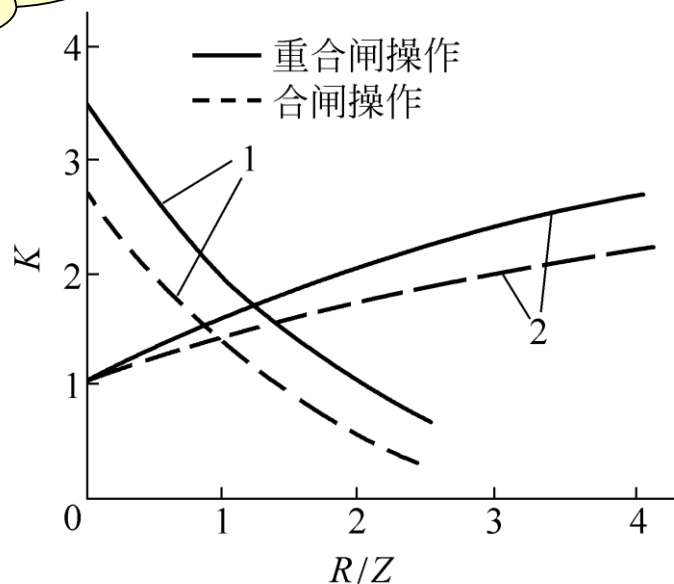
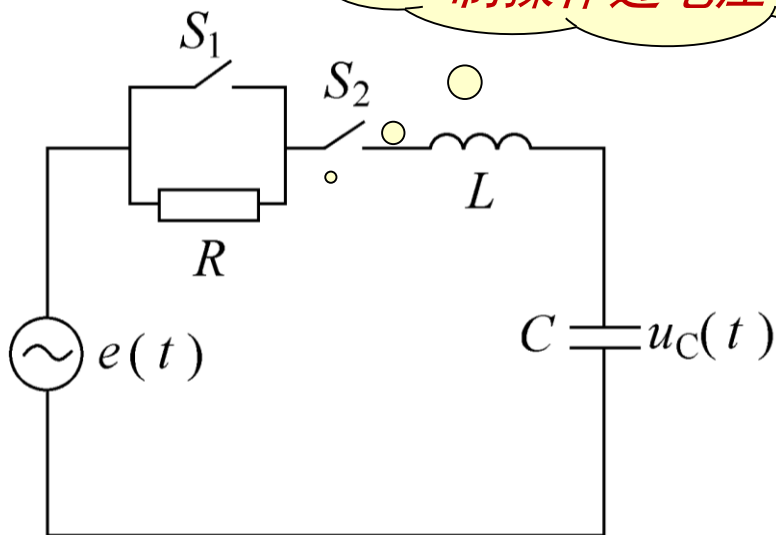


真空断路器灭电能力太强，切除感性小电流时，电流未过零即强行熄弧， di_L/dt 过大，在电动机等感性设备上出现截流过电压。

10.5 操作过电压的限制措施

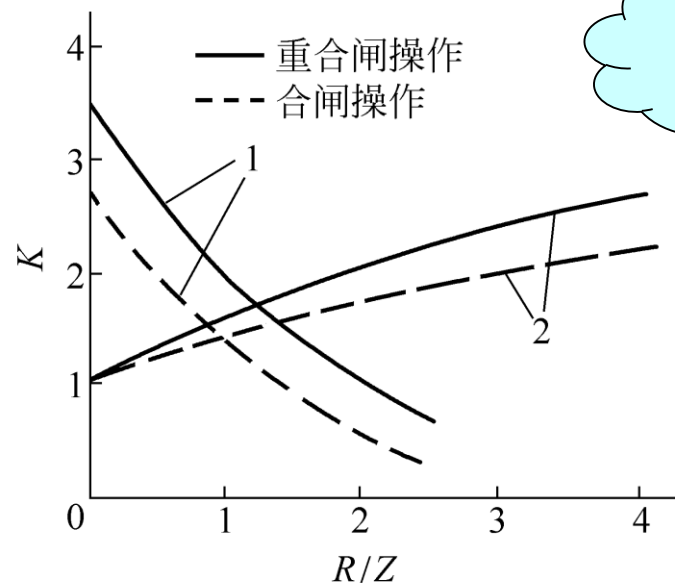
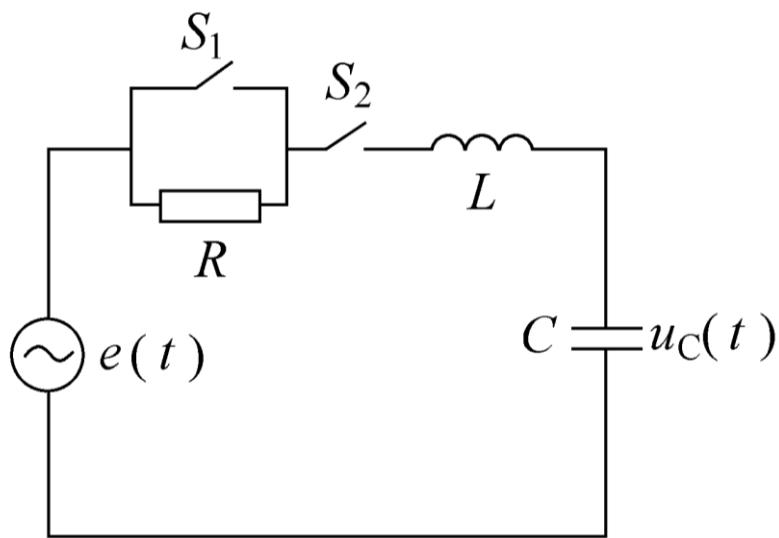
- 首先利用并联电抗器限制工频暂时过电压。
- 利用并联电阻，限制分、合闸操作过电压，避雷器为后备。
- 利用避雷器限制切空变过电压。

并联电阻如何限制操作过电压？



利用并联电阻，限制分、合闸操作过电压示意图

利用并联电阻，限制分、合闸操作过电压



并联电阻
选多大?

合闸时，先合 S_2 ，串入并联电阻 R ，1.5-2周波后再合 S_1 ；

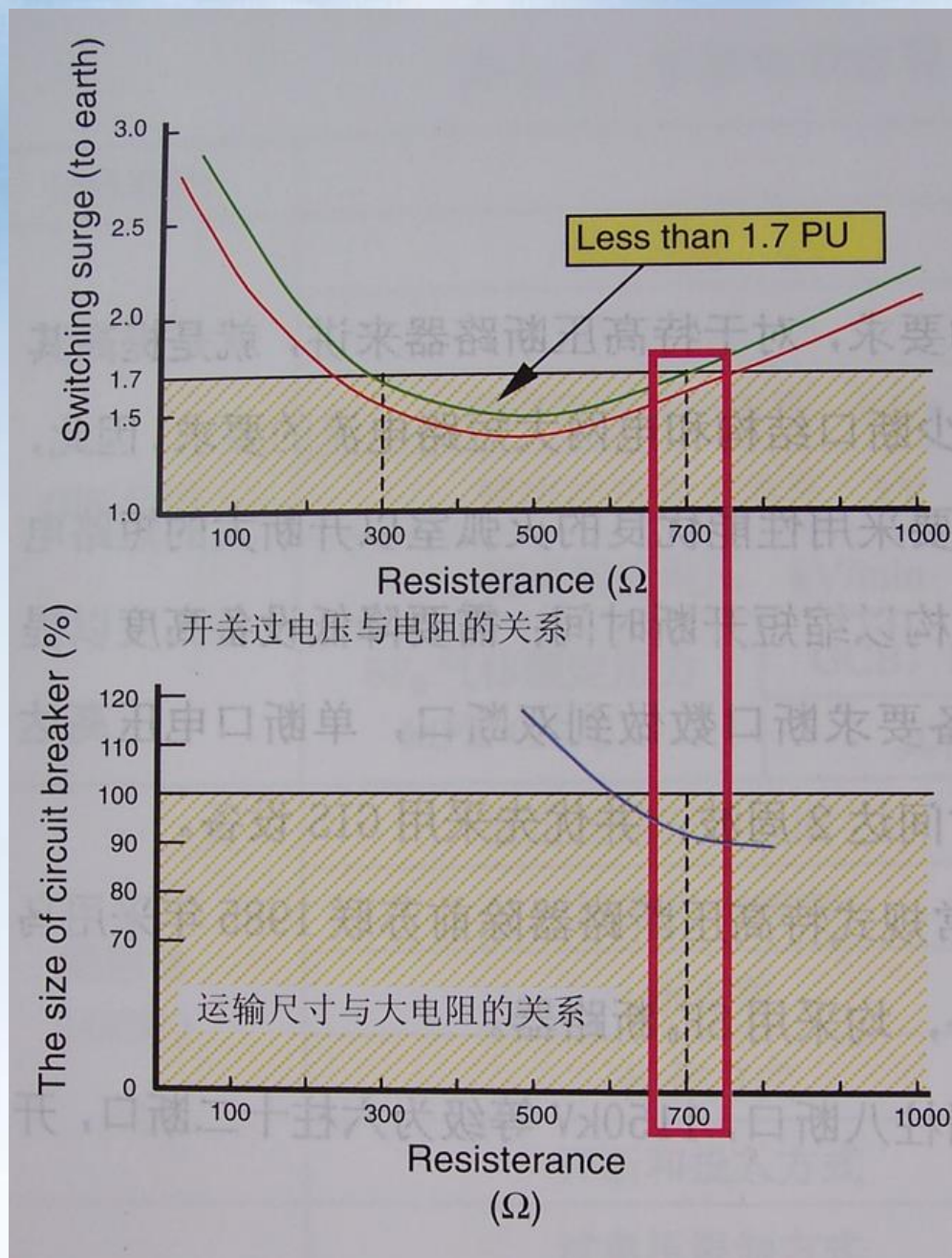
分闸时，先分 S_1 ，串入并联电阻 R ，1.5-2周波后再分 S_2 。

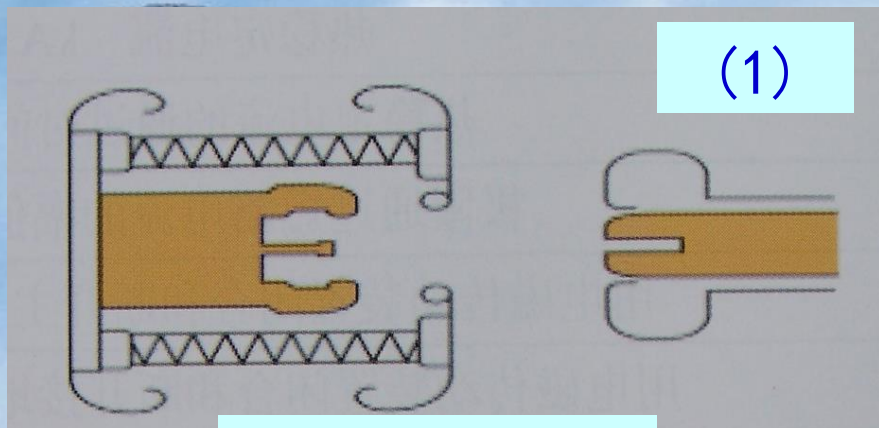
我国 500kV断路器并联电阻的接入时间一般在10-15ms。



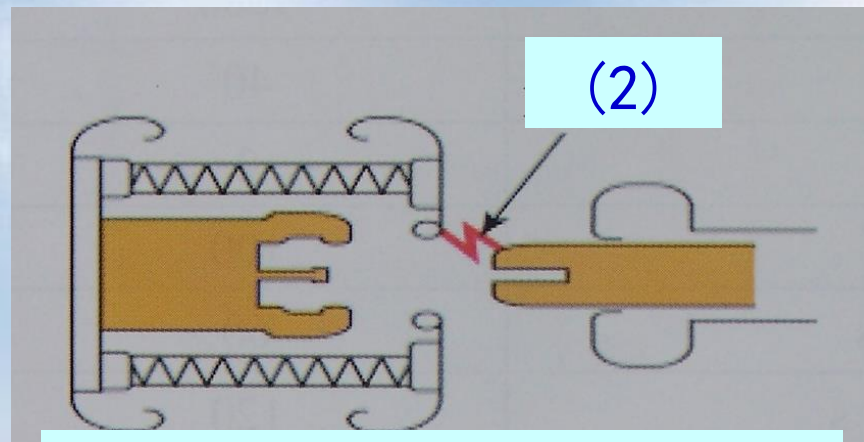
利用并联电阻 限制分、合闸 操作过电压

日本特高压断路器
并联电阻阻值选择示意

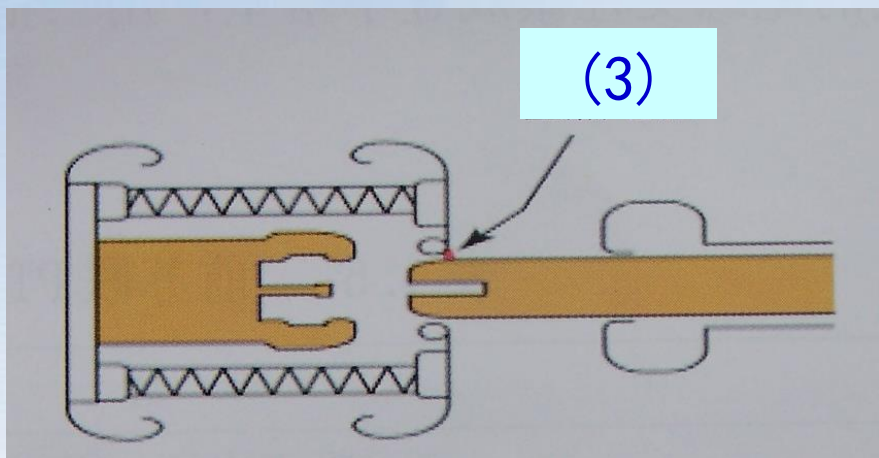




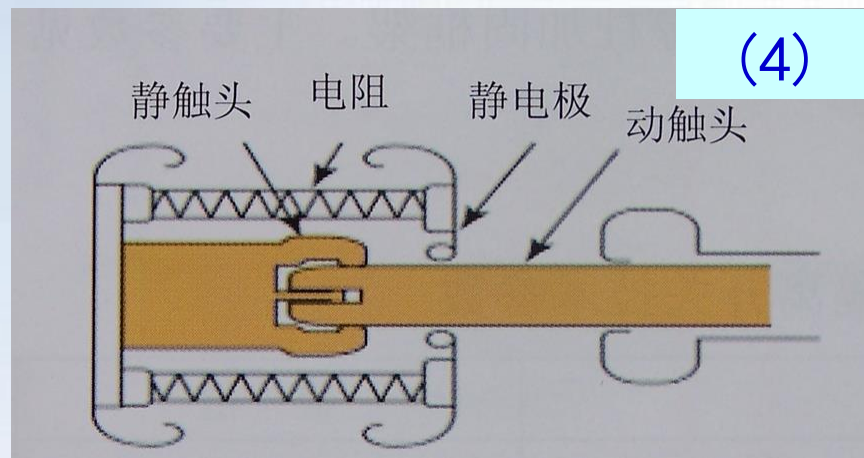
合闸之前



触头预击穿合闸电阻串入



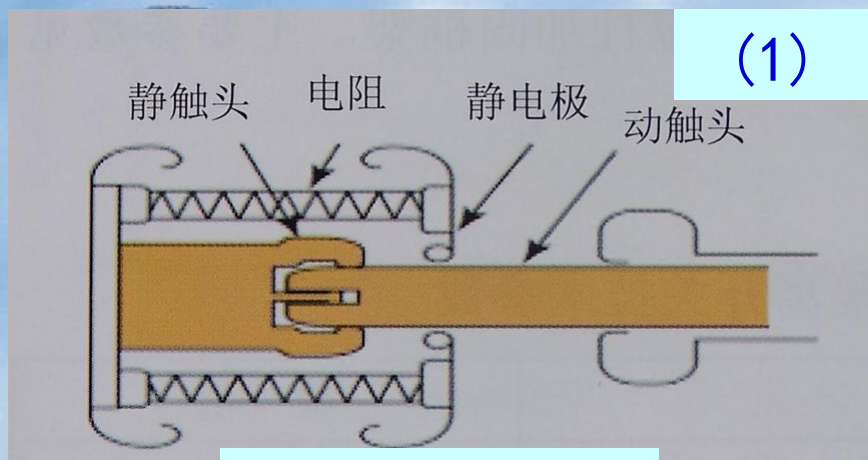
触头预击穿合闸电阻串入



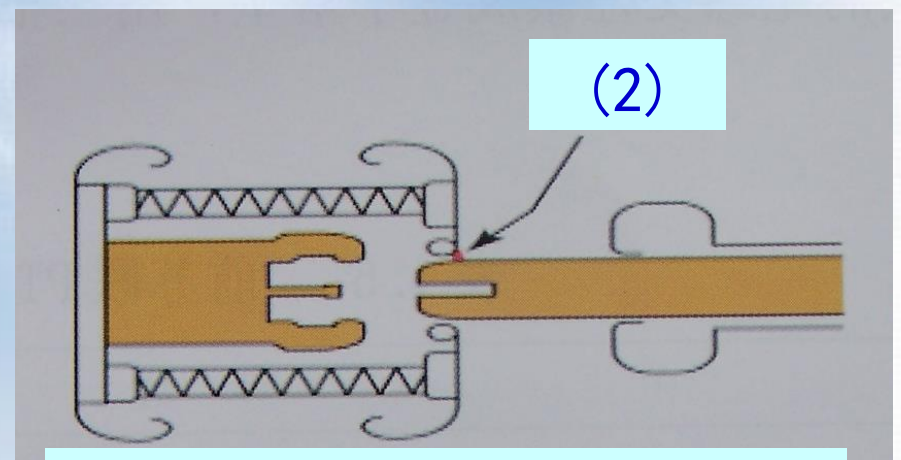
合闸完毕

断路器合闸时串入并联电阻示意图

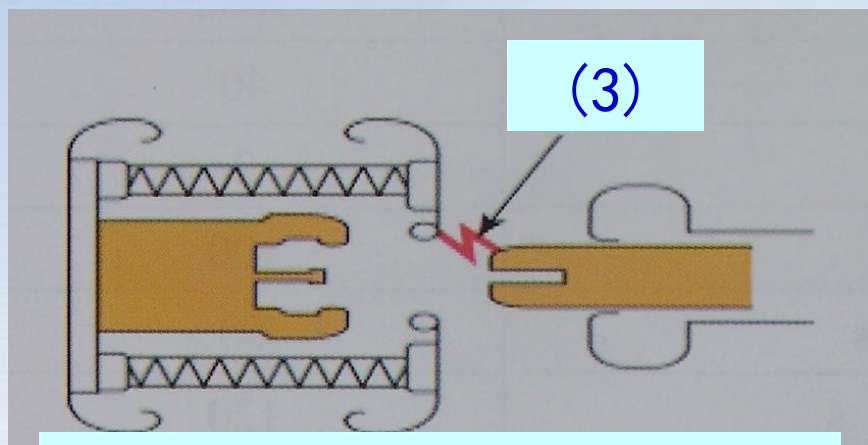
动触头一个动作过程，先后完成并联电阻的接入和退出！



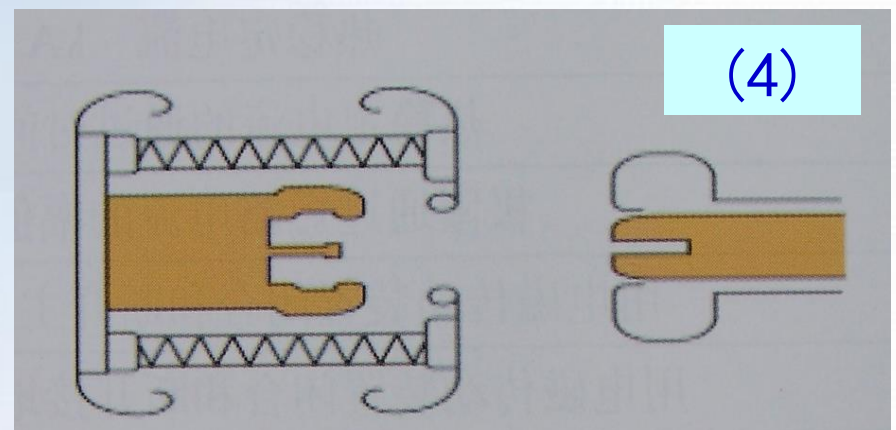
分闸之前



触头击穿分闸电阻串入



触头击穿分闸电阻串入



分闸完毕

断路器分闸时串入并联电阻示意图

动触头一个动作过程，先后完成并联电阻的接入和退出！



10.4 特快速瞬态过电压VFTO

GIS中隔离开关操作空载短母线时，由于触头运动速度相对较慢，造成隔离开关断口间隙多次重击穿，产生陡变的行波，行波在GIS波阻抗变化的节点发生多次折反射和叠加，形成VFTO。

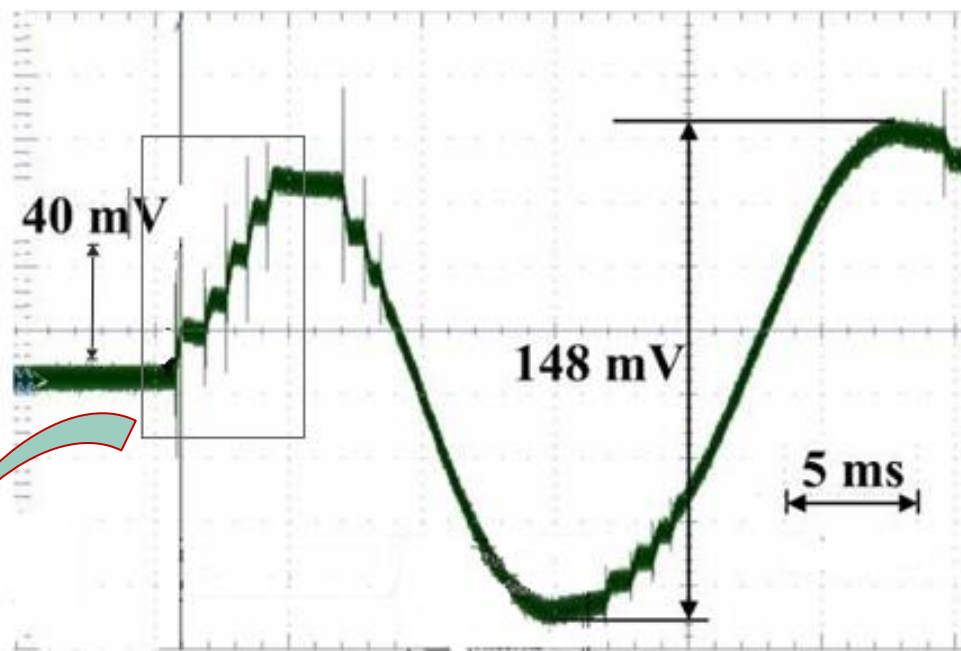
VFTO 具有幅值高、波前陡、频率高和多次连续脉冲的特点。幅值范围一般为 1.5-2.8pu, 上升时间数ns。

在高压导体(杆)与外壳之间产生的，称为内部 VFTO，对 GIS 及其连接的具有绕组的设备绝缘有重要影响。

外部VFTO 则危害与壳体连接的二次设备绝缘，或对测量控制设备产生电磁干扰，造成二次设备的误动作。

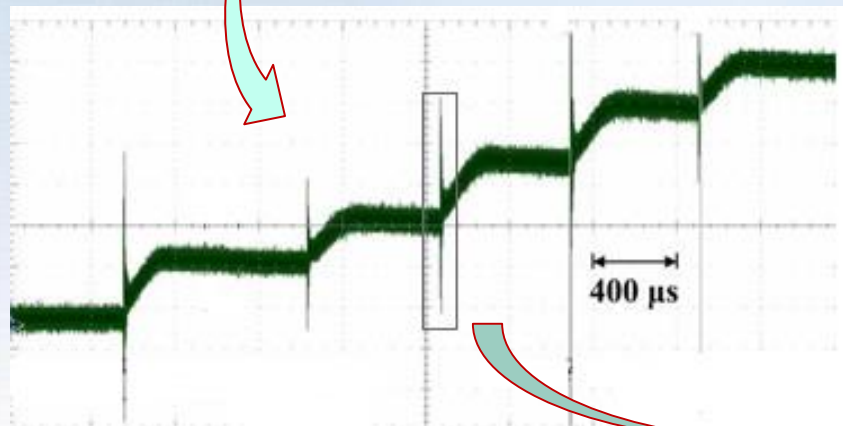
VFTO的抑制：

可在GIS的隔离开关上加装并联电阻或在GIS导电杆上加装铁氧体磁环，以抑制VFTO。

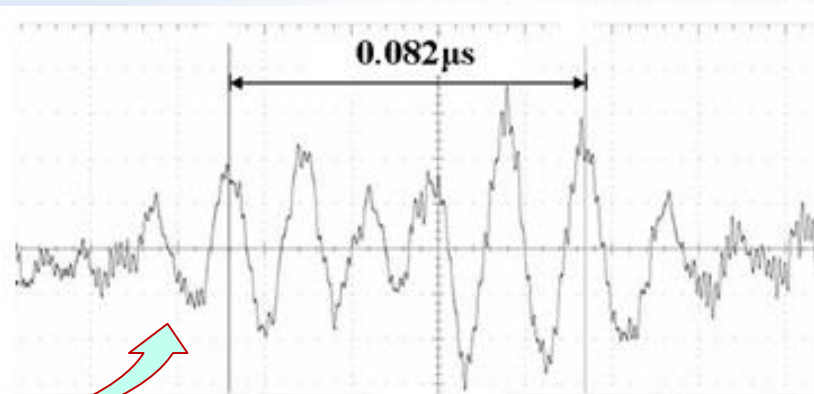


VFTO 实测波形

(a) VFTO波形



(b) 波形局部展开



(c) 单次振荡展开

10.6 绝缘配合的基本概念与基本方法

选合适的
绝缘水平

绝缘配合的基本概念

根据设备在系统中可能承受的各种电压（工作电压及过电压），并考虑限压装置的特性和设备的绝缘特性来确定设备必要的耐受强度，以使作用于设备上的各种电压所引起的绝缘损坏和影响连续运行的概率降低到在经济上和运行上能接受的水平。

在技术上处理好各种电压，各种限压措施和设备绝缘耐受能力三者之间的配合关系；

在经济上协调设备投资费、运行维护费和事故损失费（可靠性）三者之间的关系。

其他影响绝缘配合的因素：
中性点接地方式、工频过电压、系统不同时期不同结构等



绝缘配合的基本方法

惯用法（确定性方法）：

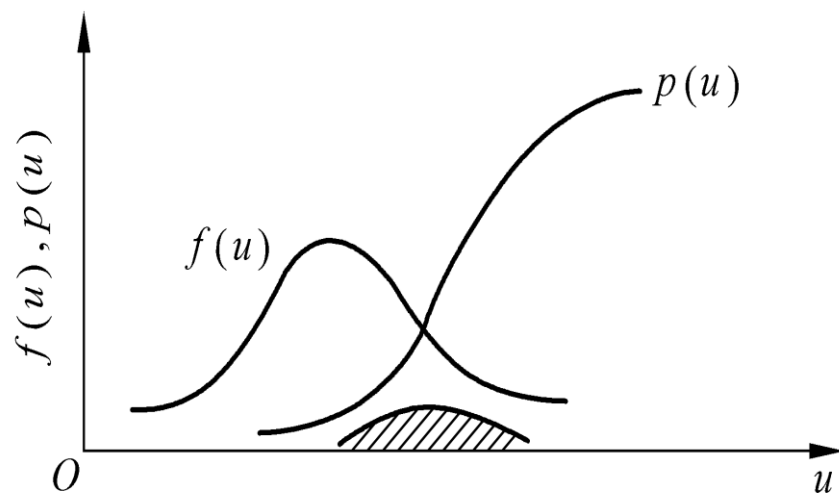
取设备最小绝缘强度不低于出现在设备上的最大过电压进行配合，并留出一定的裕度。

统计法：

在已知过电压幅值和绝缘闪络电压的概率分布后，算出绝缘闪络的概率和线路的跳闸率，在技术经济比较的基础上确定绝缘水平。

主要困难在于随机因素较多，且各种统计数据的概率分布有时并非已知。

实际上更多采用的是对某些概率进行一些假定后的简化统计法



图中总的阴影部分的面积，即由某种过电压造成绝缘击穿的概率，即故障率



绝缘配合

可靠性（停电次数及时间） vs 经济性（初投资、运行维护、停电损失）

绝缘配合问题：采用合适的限压措施及保护措施，在不过多增加设备投资的前提下，既限制可能出现的高幅值过电压，保证设备与系统安全可靠地运行，又降低对各种输变电设备绝缘水平的要求，减少主要设备的投资费用、运行维护及事故损失。

电压等级 / kV	非直接接地		直接接地				
	30 ~ 65 及以下	110~ 145	110~ 220	330	500	750	1000
允许的相对地 操作过电压倍数	4.0	3.5	3.0	2.75	2.0	1.8	1.7
允许的相间操作过电压为 相对地操作过电压的倍数	1.3 ~ 1.4			1.4 ~ 1.45	1.5		



电压等级 / kV	非直接接地		直接接地				
	30 ~ 65 及以下	110~ 145	110~ 220	330	500	750	1000
允许的相对地 操作过电压倍数	4.0	3.5	3.0	2.75	2.0	1.8	1.7
允许的相间操作过电压为 相对地操作过电压的倍数	1.3 ~ 1.4			1.4 ~ 1.45	1.5		

外过电压 (雷电过电压)	内过电压			
	工频电压升高 (暂时过电压)	谐振 过电压	弧光接地 过电压	操作过电压
雷击塔顶、 雷击导线、 雷击避雷线档 距中央、 雷击线路附近 地面	空载长线路容升 效应、不对称短 路、突然甩负荷 等引起，是操作 过电压振荡的基 础，绝缘配合必 须考虑	铁磁谐振压、 参数谐振过 电压(多出 现在配电系 统中)	中性点非 直接接地 系统单相 接地故障 引起	合空线过电压 (含重合闸过电压) 切空线过电压 切空变过电压 解列过电压 截流过电压 VFTO

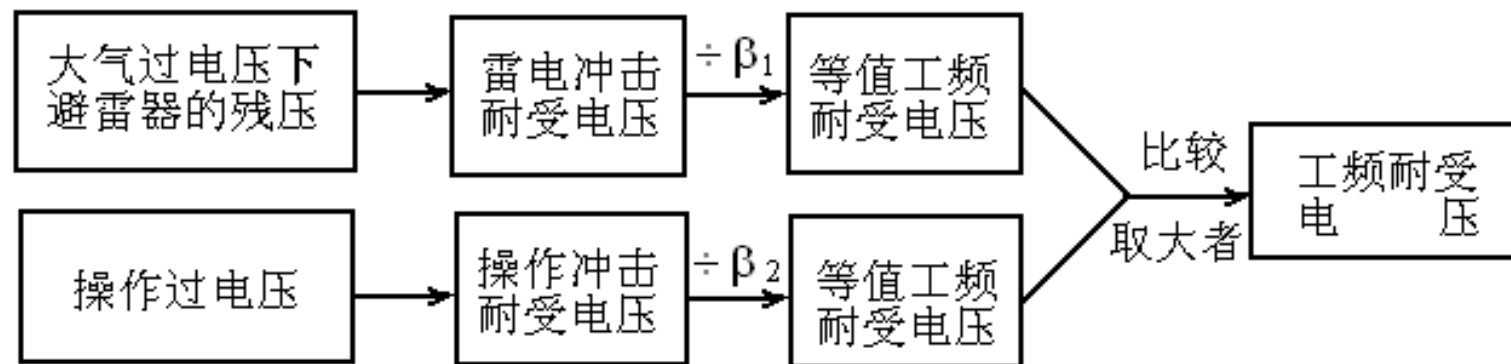
电气设备的绝缘水平：

用设备可以承受（不发生闪络、放电或其它损坏）的试验电压值表示的绝缘强度，单位KV。

对应于设备绝缘可能承受的各种工作电压，分全波基本冲击绝缘水平（BIL）、基本操作冲击绝缘水平（BSL）以及工频绝缘水平。

试验则对应于雷电冲击试验、操作冲击试验、短时(1min)工频试验、以及特殊情况下的稍长时间工频试验。

电压等级不高时，为了试验的方便，常用工频耐受电压代替，如下图



电压等级高了以后，雷电冲击、操作冲击应分别进行试验，不能用工频试验代替。

高电压等级的设备，可以根据需要选择不同级别的绝缘水平。见附录表A-1、A-2、A-3



电气设备的绝缘水平：

用设备可以承受（不发生闪络、放电或其它损坏）的试验电压值表示的绝缘强度，单位KV。

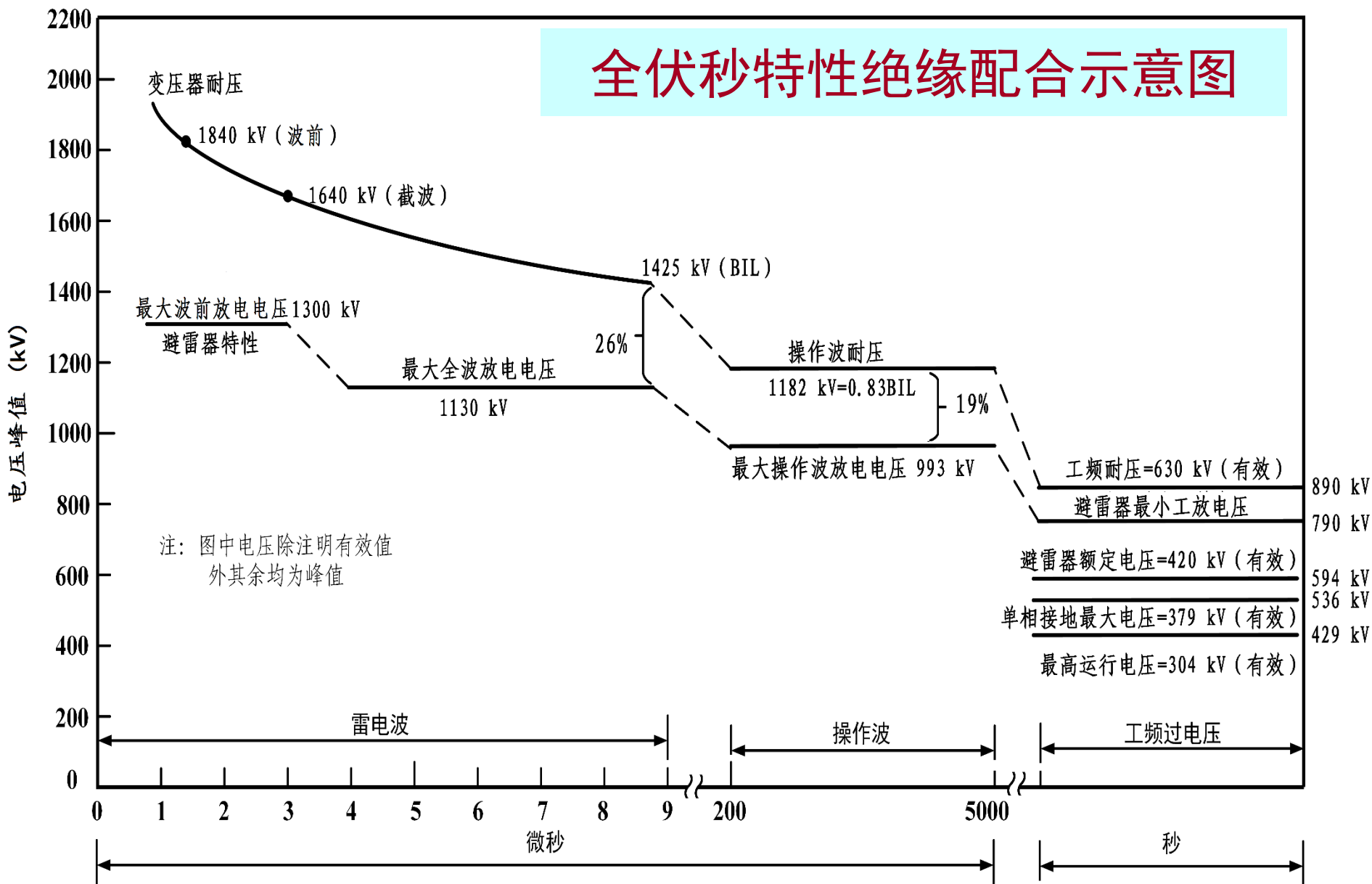
BIL、BSL以及工频绝缘水平分别对应于雷电冲击试验、操作冲击试验、短时(1min)工频试验、以及特殊情况下的稍长时间工频试验。

例如：

变压器的BIL与避雷器雷电冲击保护水平(U_p)的配合系数一般在1.2~1.4之间。IEC规定 $BIL \geq 1.2 U_p$ ；

变压器的BSL与避雷器的操作冲击保护水平(U_p')相配合， $BSL \geq 1.15 U_p'$ 。
选定避雷器的保护水平之后，对变压器的绝缘水平(BIL、BSL)也就有了明确要求。

全伏秒特性绝缘配合示意图



美国中南部电力公司500kV电网对变压器和并联电抗器的绝缘配合示意图

全伏秒特性绝缘配合示意图

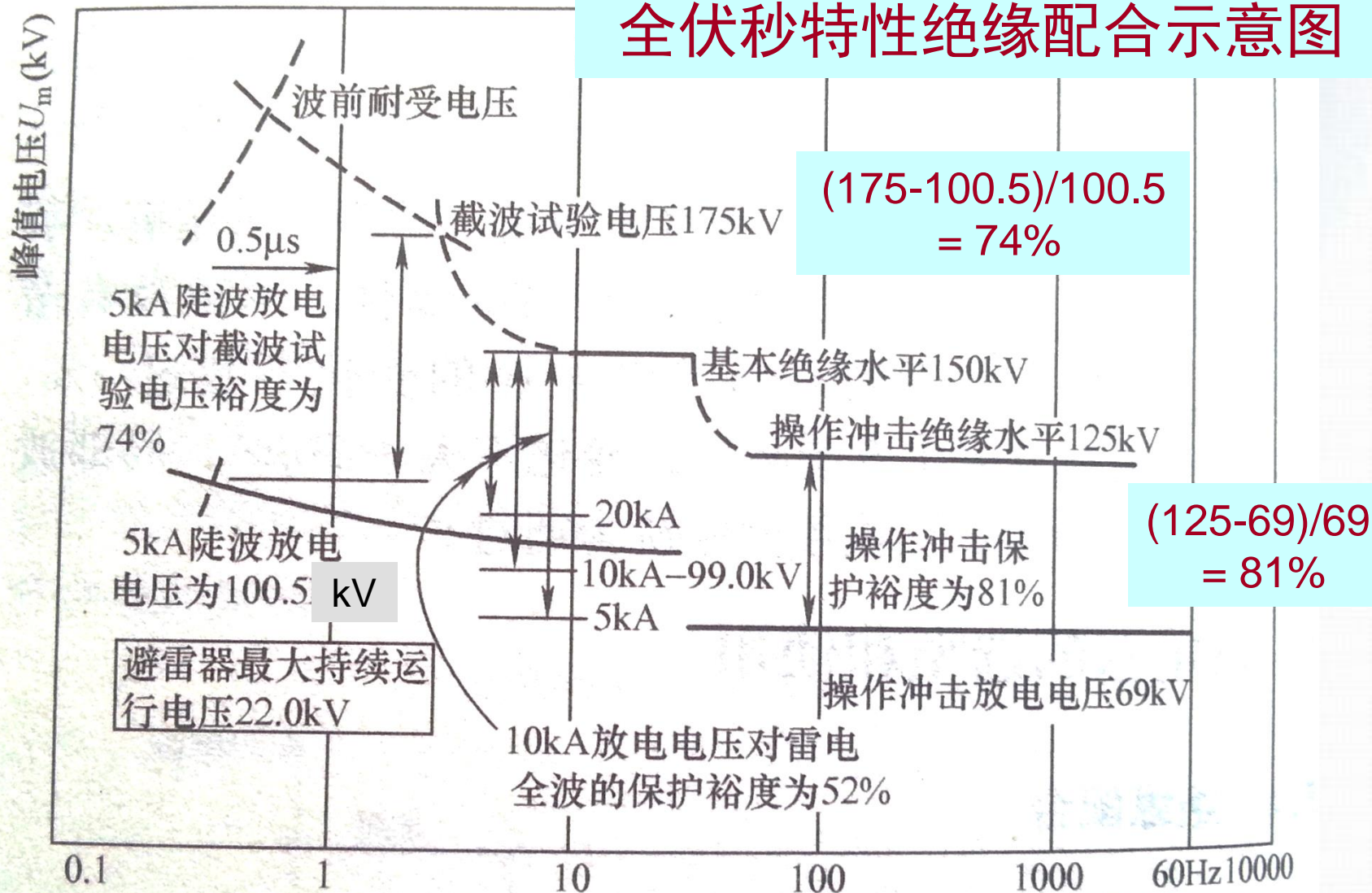


图 5.2-24 避雷器与油浸式变压器的绝缘配合

GIS 变电站 绝缘配合 示意图

注意：
极不均匀场与
稍不均匀场的
极性效应

注意：
保护设备与
被保护设备的
伏秒特性

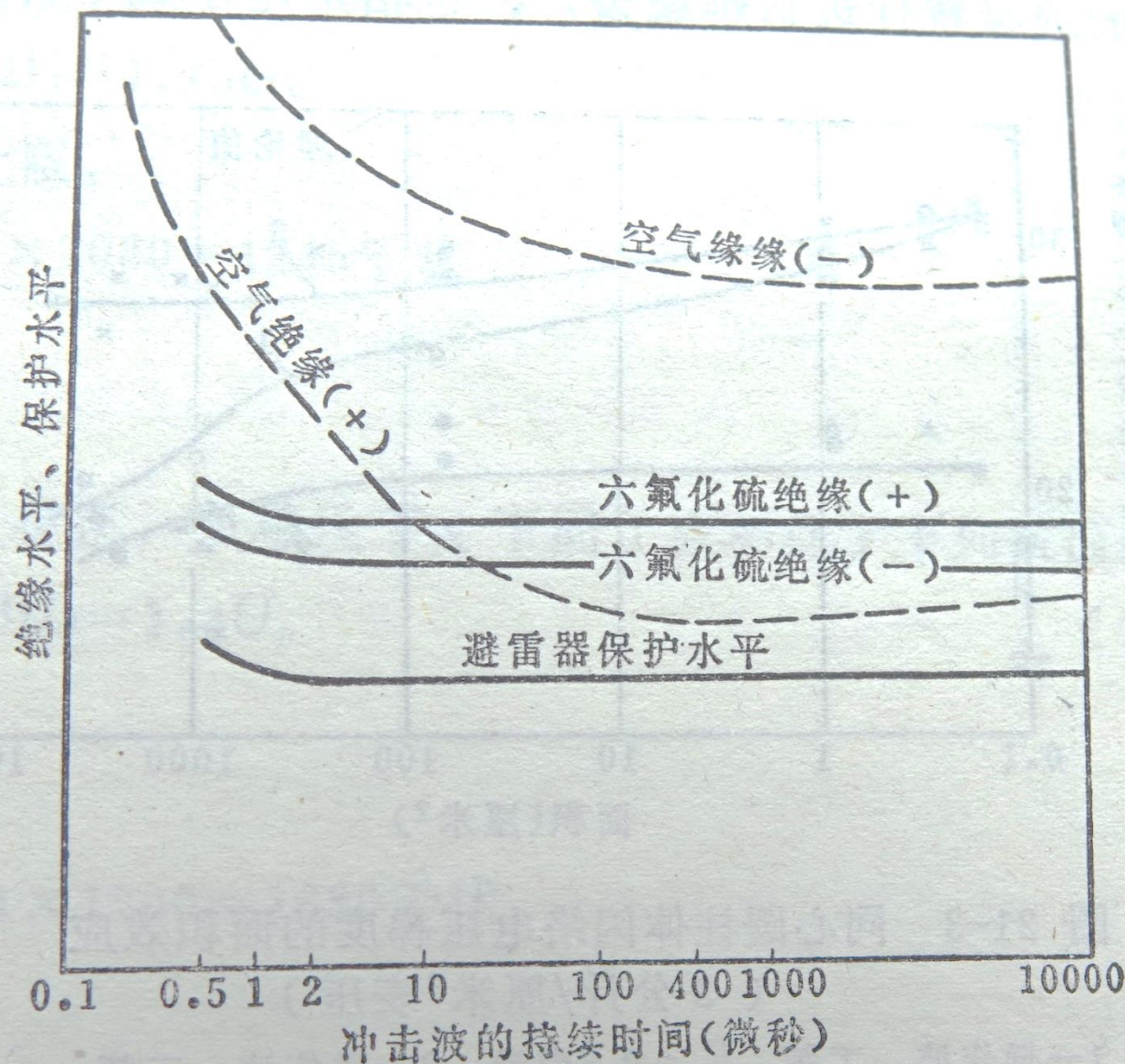


图 21-1 六氟化硫全封闭变电所的绝缘配合示意（虚线为常规变电所的外绝缘）



我国变电站的绝缘配合基本原则：

对220kV及以下系统，电气设备的绝缘水平主要由雷电过电压决定；
对330kV及以上电压等级的超高压系统，操作过电压成为主要矛盾。

制定过电压保护策略时**首先**用并联电抗器将工频过电压限制在一定范围，

然后通过断路器并联电阻或改进断路器性能，将操作过电压控制在一定范围，

再用避雷器作为后备保护（避雷器在操作过电压下不必频繁动作）。

所以，电站设备的绝缘水平由避雷器在雷电过电压下的残压（保护水平）决定。

我国输电线路的绝缘配合基本原则：

综合了不同电压与风速配合后，保持一定耐雷水平、控制一定的雷击跳闸率；在污秽地区，外绝缘水平由最高工作电压决定。

塔头间隙的确定：

S_1 ：工频过电压+最大风速

S_2 ：操作过电压+50%最大风速

S_3 ：雷电过电压+10m/s风速

绝缘子片数/串长的确定：

在最高工作电压下不发生污闪

操作过电压下不发生雨闪

雷击时保证一定的耐雷水平

