



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

第7章 电力系统暂时过电压 Temporary Overvoltage

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月





暂时过电压

§1. 工频电压升高

§2. 谐振过电压

个人参考学习，请勿网络传播



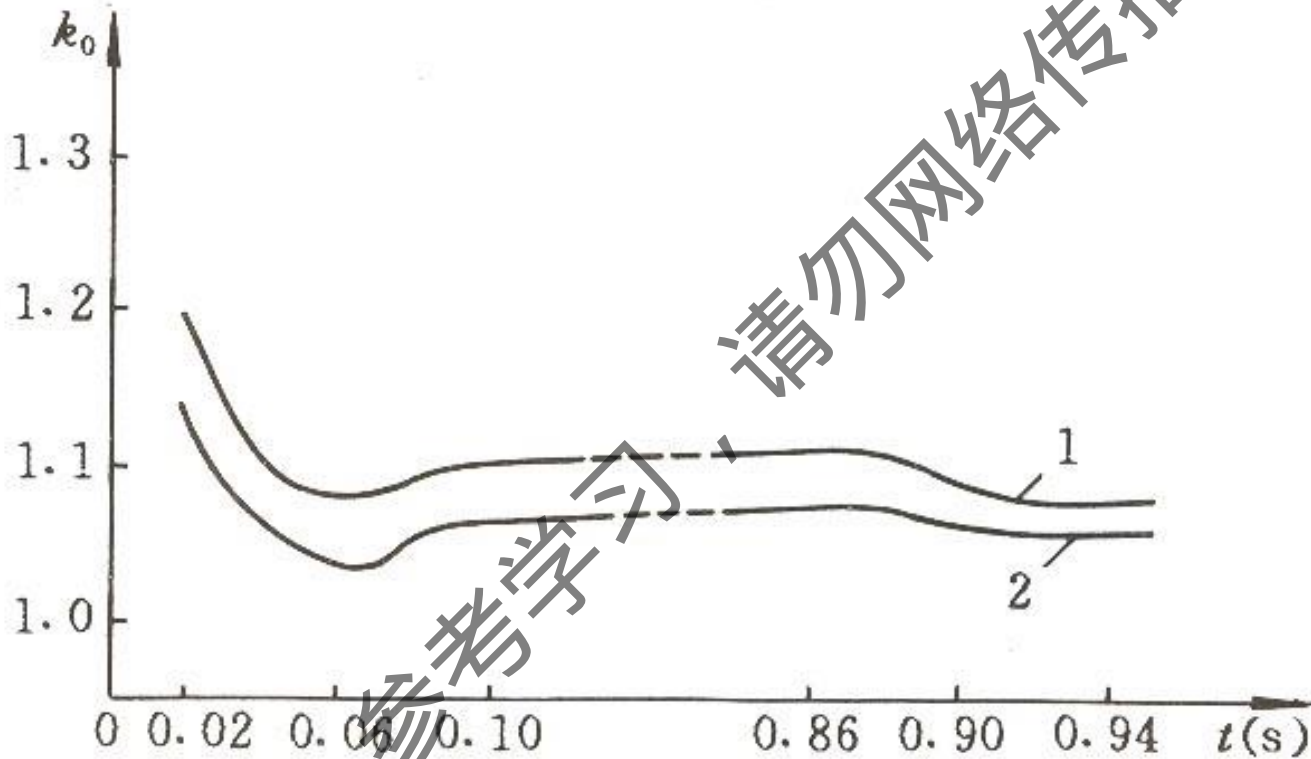
§1. 工频电压升高

■ 内部过电压（能量来自系统内部）

- 在电力系统内部，由于断路器操作或发生故障，使系统参数发生变化，引起电网电磁能量的转化或传递，在系统中出现的过电压。
- 操作过电压
 - 一般持续时间在 **0.1 s（五个工频周波）** 以内的过电压
- 工频过电压
 - 持续时间长的过电压则称为暂时过电压。暂时过电压中，频率为工频或接近工频的过电压
- 谐振过电压
 - 因系统的电感，电容参数配合不当，出现的各类持续时间长、波形周期性重复的谐振现象及其电压升高，称为谐振过电压



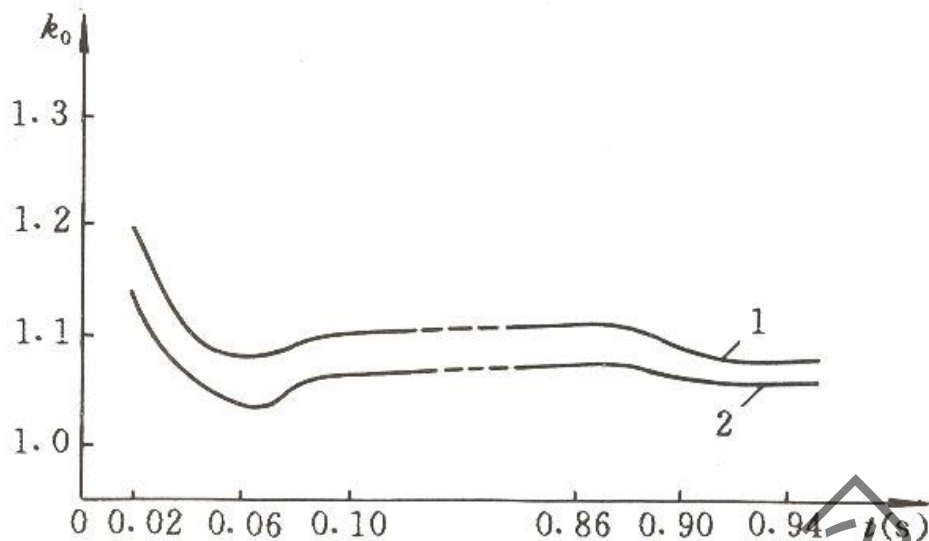
§1. 工频电压升高



在500 kV 输变电系统中，实测得到的某 336 km 空载线路合闸过电压随时间变化的曲线，图中 k_0 为过电压倍数。该线路的断路器带有 400 Ω 的合闸电阻，线路两端并联电抗器的补偿度为 71.5 %。



§1. 工频电压升高



★合闸后 0.1 s 前
高幅值、强阻尼的高频振荡操作过电压

★合闸后 0.1 ~ 1.0 s 时间内：暂态工频电压升高。由于发电机自动电压调整器的惯性，发电机的暂态电势 $E'd$ 保持不变，再加上空载线路的电容效应，使电压升高，1.0s 后，由于发电机的自动电压调整器开始发生作用，母线电压逐渐下降。

★在 2 ~ 3 s 以后：
稳态工频电压升高，系统进入稳定状态。



§1. 工频电压升高

■ 超高压系统中工频电压升高的重要性

- 对过电压保护及绝缘配合影响较大的是暂态工频电压升高，当然稳态工频电压升高对系统的电气设备也有一定的影响。
- 220kV 电压等级以下
 - 一般而言，工频电压升高对 220kV 电压等级以下、线路不太长的系统的正常绝缘的电气设备是没有危险的。
- 超高压系统
 - 工频电压升高对超高压、远距离传输系统绝缘水平的确定却起着决定性的作用。
 - 避雷器：最大允许工作电压就是按照电网中工频电压升高来确定的。工频电压升高的幅度越大，要求避雷器的灭弧电压越高。



§1. 工频电压升高

■ 超高压系统中工频电压升高的重要性

➤ 超高压系统

- **断路器并联电阻**：工频电压升高幅值越大，对断路器并联电阻热容量的要求也越高，从而给制造低值并联电阻带来困难。
- **操作过电压**：操作过电压与工频电压升高是同时发生的，因此工频电压的升高直接影响操作过电压的幅值。
- **工频电压升高持续时间长，对设备绝缘及其运行性能有重大影响。**例如，可导致油纸绝缘内部游离，污秽绝缘子的闪络、铁心的过热、电晕等。



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

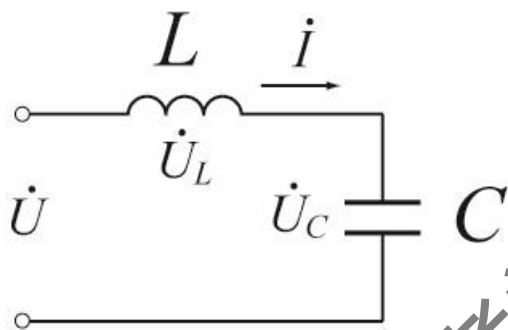
- ① 空载长线的电容效应
- ② 不对称短路引起的工频电压升高
- ③ 突然甩负荷引起的工频电压升高



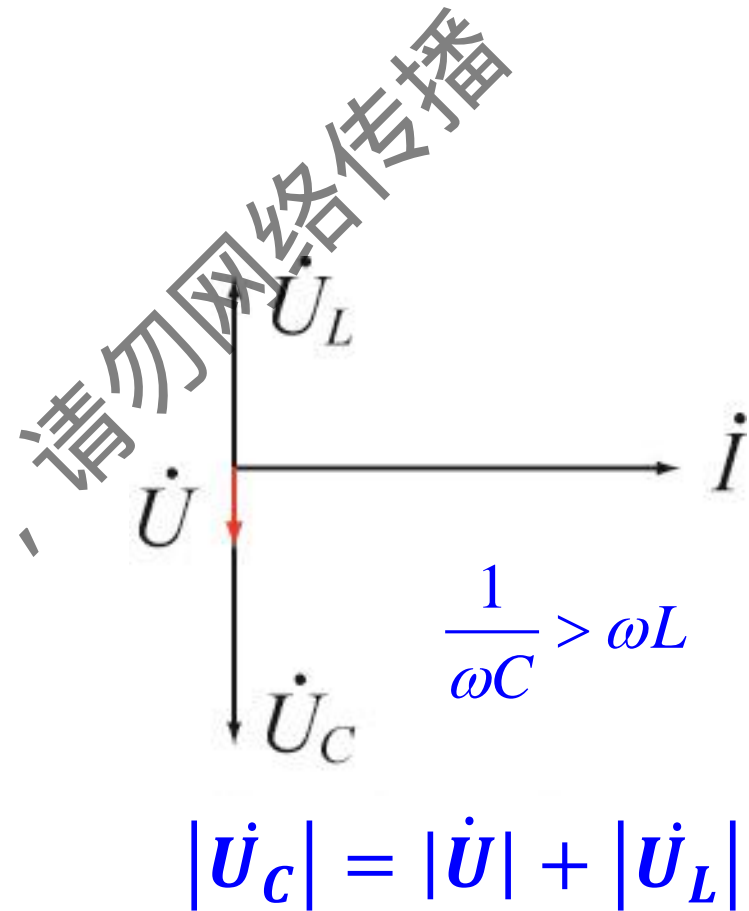
§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ① 空载长线的电容效应



集中参数LC串联回路的电容效应

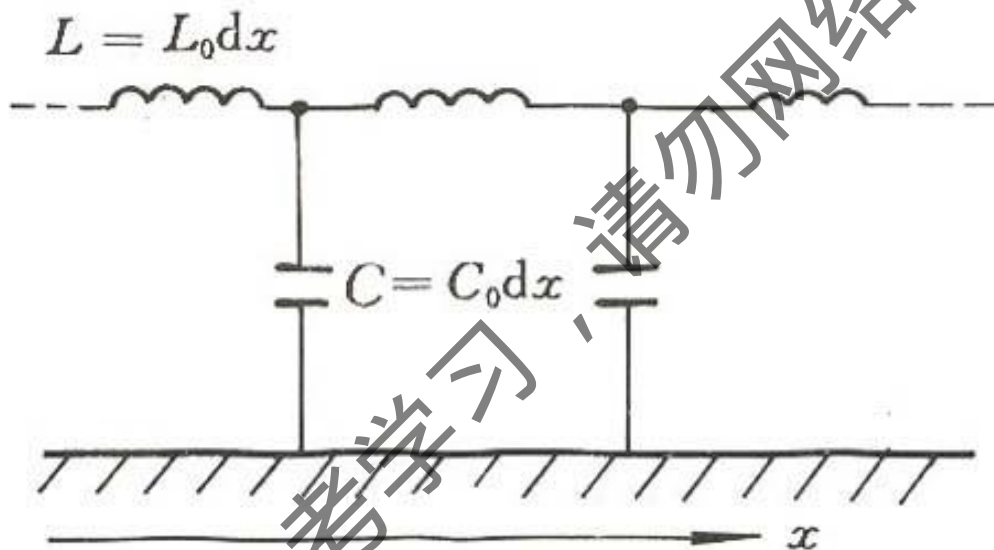




§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ① 空载长线的电容效应



一条空载长线可以看作由无数个串联的 L , C 回路构成, 在工频电压作用下, 线路的总容抗一般远大于导线的感抗, 因此线路各点的电压均高于线路首端电压, 而且愈往线路末端电压愈高。



§1. 工频电压升高

■ 电压传递系数



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha' l + j \dot{I}_2 Z \sin \alpha' l \\ \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_2}{Z} \sin \alpha' l + \dot{I}_2 \cos \alpha' l \end{cases} \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha' l & jZ \sin \alpha' l \\ j \frac{\sin \alpha' l}{Z} & \cos \alpha' l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

式中 Z ：线路的波阻抗， Ω

α' ：相位系数， $\alpha' = \omega \sqrt{L_0 C_0}$

(ω 为电源角频率， L_0 ， C_0 分别为导线单位长度的电感与电容)，对于输电线路，通常 $\alpha' \approx 0.06^\circ / \text{km}$ ；

l ：线路的长度，km。



§1. 工频电压升高

■ 电压传递系数

➤ 不考虑电源阻抗

若线路末端开路，即：

$$\dot{I}_2 = 0$$

线路首、末端电压关系为：

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 / \cos \alpha' l$$

$$|\cos \alpha' l| \leq 1 \Rightarrow |\dot{U}_2| \geq |\dot{U}_1|$$

① 线路末端电压高于首端

② 当 $\alpha' l = \pi/2$ 时, $\cos \alpha' l = 0$

不论首端电压为多高，末端电压将趋于无穷大。



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha' l + j \dot{I}_2 Z \sin \alpha' l \\ \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_2}{Z} \sin \alpha' l + \dot{I}_2 \cos \alpha' l \end{cases}$$

$$l = \frac{\pi v}{2\omega} = \frac{\lambda}{4}$$

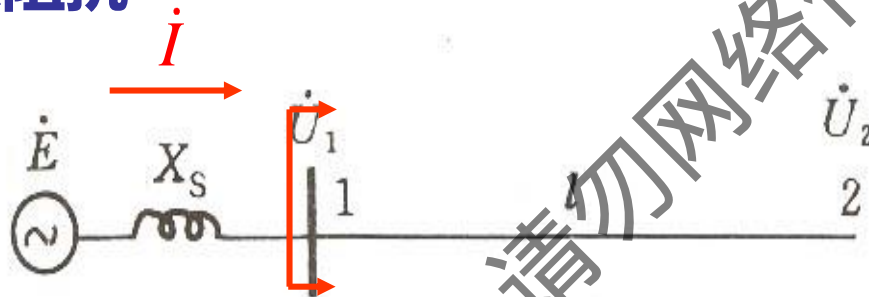
此时，线路电感与电容构成谐振状态。称为1/4 波长谐振。



§1. 工频电压升高

■ 电压传递系数

➤ 考虑电源阻抗



$$\dot{E} = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 X_s$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1$$

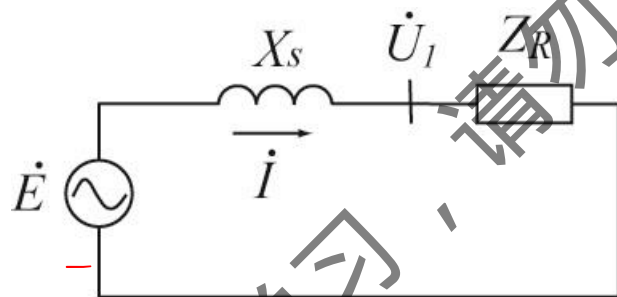
$$\begin{bmatrix} \dot{E} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha' l & jZ \sin \alpha' l \\ j \frac{\sin \alpha' l}{Z} & \cos \alpha' l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$



§1. 工频电压升高

■ 电压传递系数

- 考虑电源阻抗
- 若线路末端开路，从首端往线路看去，可等值为一个阻抗 Z_R



$$Z_R = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = -jZ \cot \alpha' l$$

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E}}{jX_s + Z_R} Z_R = \frac{\dot{E}}{X_s - Z \cot \alpha' l} (-Z \cot \alpha' l)$$



§1. 工频电压升高

■ 电压传递系数

➤ 考虑电源阻抗

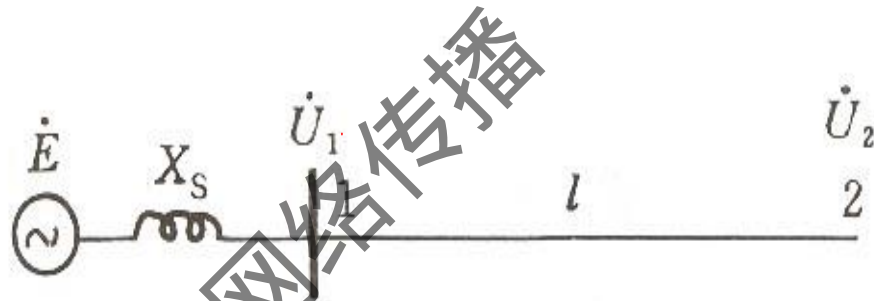
线路首端对电源的电压传递系数

$$K_{01} = U_1 / E = \frac{Z \cot \alpha' l}{Z \cot \alpha' l - X_s}$$

线路末端对电源电势的传递系数

$$K_{02} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{E}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}} \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z \cot \alpha' l}{Z \cot \alpha' l - X_s} \frac{1}{\cos \alpha' l} = \frac{1}{\cos \alpha' l - \frac{X_s}{Z} \sin \alpha' l}$$

令 $\varphi = \arctan \frac{X_s}{Z}$ 则 $\longrightarrow K_{02} = \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha' l + \varphi)}$

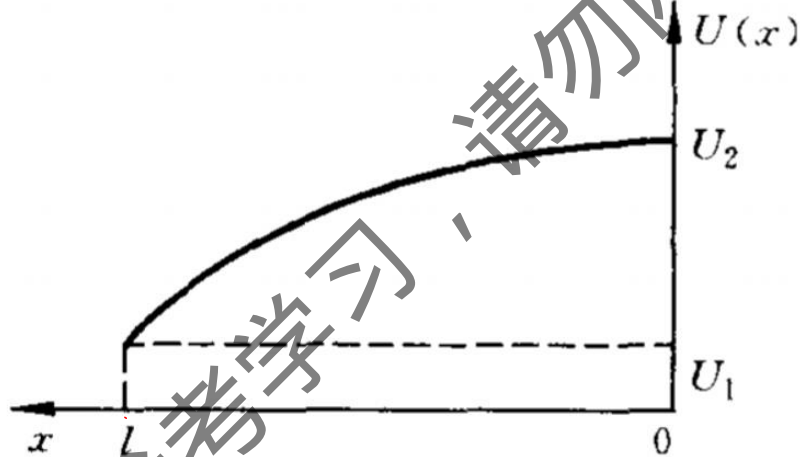




§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ① 空载长线的电容效应



$$\frac{1}{\cos \alpha' x}$$

图 5-1-3 空载无损长线电压分布

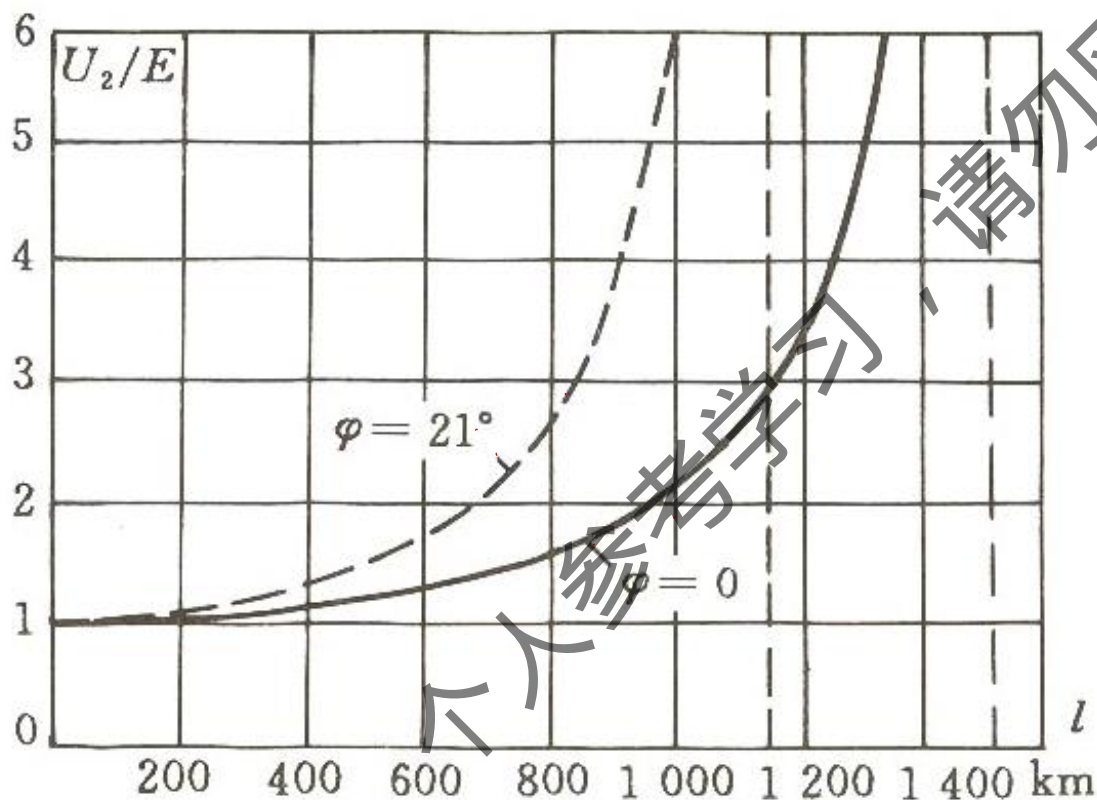
从线路末端到首端呈余弦分布



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ① 空载长线的电容效应



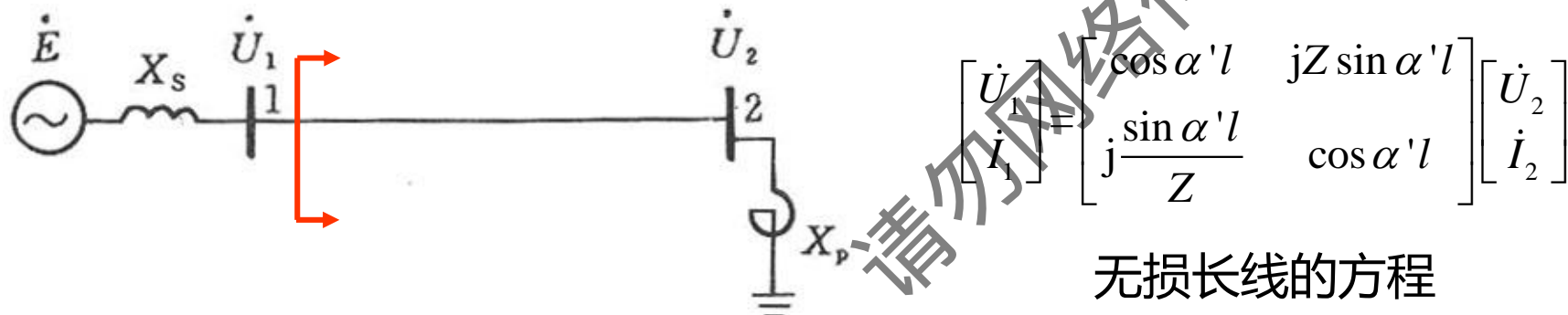
★ 电源阻抗 X_s 越大，工频电压升高越严重

★ 工频电压升高的情况可能与线路长度，电源阻抗(电源容量)等情况有关，因为电源容量越小，其阻抗越大，故计算工频电压升高时，必须计及系统可能出现最小运行方式。



§1. 工频电压升高

■ 利用并联电抗器补偿空载线路的电容效应



无损线路末端接有并联电抗器

$\dot{U}_2 = jX_p \dot{I}_2$ 令 $\theta = \arctan \frac{Z}{X_p}$ 则线路首末端电压的传递系数为:

$$K_{12} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \alpha' l + \frac{Z}{\omega L} \sin \alpha' l} = \frac{\cos \theta}{\cos(\alpha' l - \theta)} \quad (\theta \text{由零增加, } K_{12} \text{减小})$$



§1. 工频电压升高

■ 利用并联电抗器补偿空载线路的电容效应

$$K_{12} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \alpha' l + \frac{Z}{\omega L} \sin \alpha' l} = \frac{\cos \theta}{\cos(\alpha' l - \theta)}$$

末端开路首端看进去的阻抗:

$$Z_R = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = -jZ \cot \alpha' l$$

末端接电抗器首端看进去的阻抗:

$$Z_R = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = -jZ \cot(\alpha' l - \theta)$$

电源对线路首端的传递系数为:

$$K_{01} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}} = \frac{Z_R}{Z_R + jX_S} = \frac{-Z \cot(\alpha' l - \theta)}{X_S - Z \cot(\alpha' l - \theta)}$$



§1. 工频电压升高

■ 利用并联电抗器补偿空载线路的电容效应

电源对线路末端的传递系数为：

$$K_{02} = K_{01} K_{12} = \frac{\cos \theta}{\cos(\alpha' l - \theta)} \times \frac{-Z \cot(\alpha' l - \theta)}{X_s - Z \cot(\alpha' l - \theta)} = \frac{\cos \theta \cos \varphi}{\cos(\alpha' l - \theta + \varphi)}$$

$$\text{其中: } \varphi = \arctan \frac{X_s}{Z}$$

线路末端电抗器可以降低电压传递系数 K_{02} ，从而降低了线路的末端电压。



§1. 工频电压升高

■ 利用并联电抗器补偿空载线路的电容效应

➤ 补偿度

- 并联电抗器的容量 Q_L 对空载长线电容无功功率 Q_C 的比值 Q_L/Q_C 称为补偿度。

- 并联电抗器的设置不仅涉及工频电压升高的抑制，还涉及系统无功平衡、潜供电流补偿、自激过电压及非全相状态下的谐振等问题。其补偿度及安装位置的选择，必须综合考虑实际系统的结构、参数、可能出现的运行方式及故障形式等因素，然后确定合理的方案。



§1. 工频电压升高

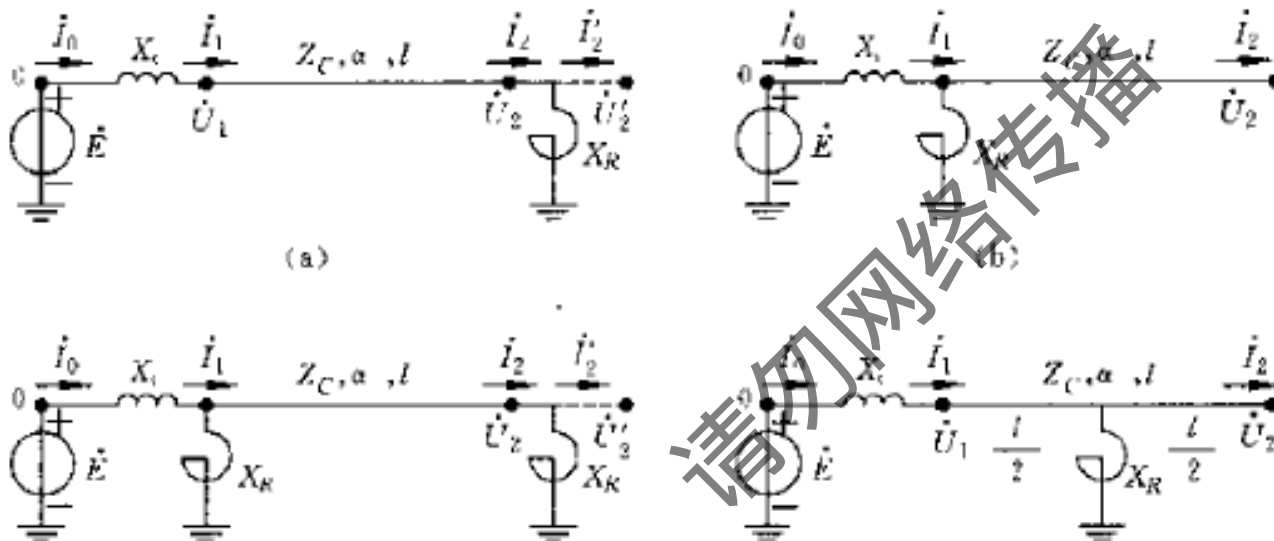


图 5-4-1(a)

$$\frac{\left(1 + \frac{X_i}{X_R}\right) \cos \alpha l + \left(\frac{Z_C}{X_R} - \frac{X_i}{Z_C}\right) \sin \alpha l}{1}$$

图 5-4-1(b)

$$\frac{\left(1 + \frac{X_i}{X_R}\right) \cos \alpha l - \frac{X_i}{Z_C} \sin \alpha l}{1}$$

图 5-4-1(c)

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{2X_i}{X_R}\right) \cos \alpha l + \left(\frac{X_i}{Z_C} - \frac{Z_C}{X_R} + \frac{Z_C X_i}{X_R^2}\right) \sin \alpha l}$$

图 5-4-1(d)

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{X_i}{2X_R}\right) \cos \alpha l - \left(\frac{X_i}{Z_C} - \frac{Z_C}{2X_R}\right) \sin \alpha l + \frac{X_i}{2X_R}}$$



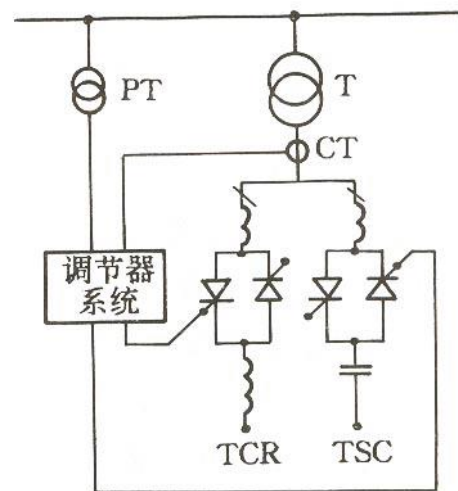
§1. 工频电压升高

■ 利用静止补偿装置 (SVC) 限制工频过电压

- 并联电抗器在工频过电压时，将起到限制作用。但平时若一直接入系统，需消耗系统大量的无功功率，造成不必要的浪费。
- SVC根据线路输送功率调整线路补偿度。

它包含三个部分：

- ①可控硅开关投切电容器组 (TSC) ；
- ②可控硅相角控制的电抗器组 (TCR) ；
- ③调节系统。

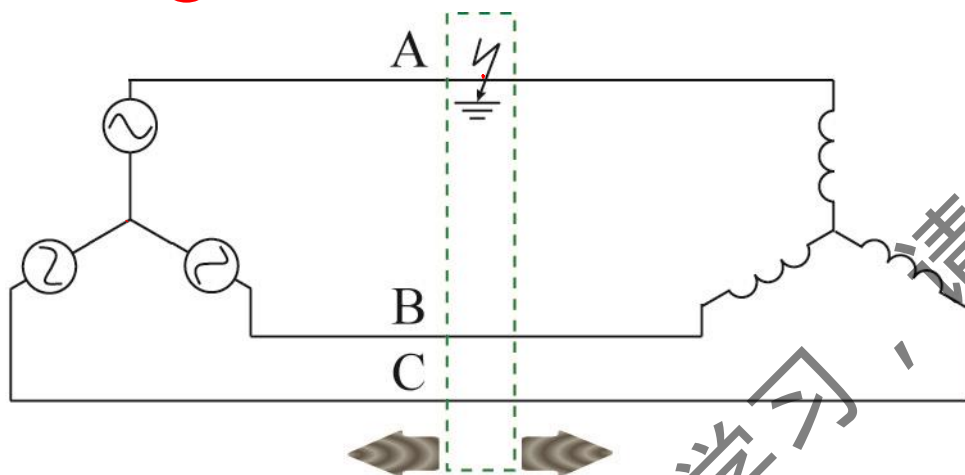




§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高



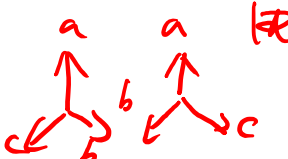
单相接地故障模型

当线路上出现单相或两相接地故障时，健全相上工频电压升高不仅由长线的电容效应所致，还有短路电流的零序分量，也会使健全相电压升高。

$$\begin{cases} \dot{U}_B = \frac{(a^2 - 1)Z_0 + (a^2 - a)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \dot{E}_A \\ \dot{U}_C = \frac{(a - 1)Z_0 + (a^2 - a)Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \dot{E}_A \end{cases}$$

式中 \dot{E}_A : 正常运行时故障点处A相电压;

Z_1, Z_2, Z_0 : 从故障点看进去的电网正序、负序、零序阻抗;

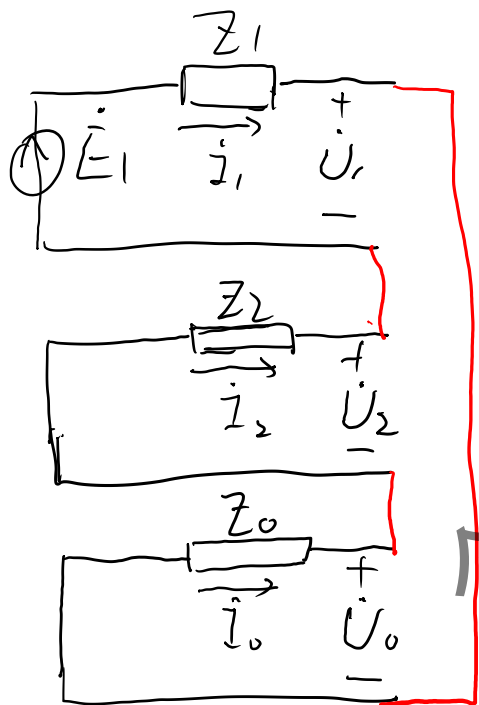
对称分量法、正序、负序、零序 

$$a = e^{j120^\circ}$$



$$\begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_1 \\ \dot{F}_2 \\ \dot{F}_0 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} \dot{F}_1 \\ \dot{F}_2 \\ \dot{F}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & a^2 & 1 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{bmatrix}$$

$\dot{U}_A = 0, \dot{I}_A \neq 0, \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0 \Rightarrow \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0$ 单相接地
 $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0$



$$\Rightarrow \dot{I} = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0$$

$$= a^2 (\dot{E}_1 - \dot{I} Z_1) + a (-\dot{I} Z_2) + (-\dot{I} Z_0)$$

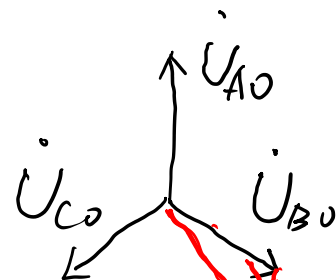
$$= a^2 \dot{E}_1 - \dot{I} (a^2 Z_1 + a Z_2 + Z_0)$$

$$\text{令 } Z_1 = Z_2 = jX_1, \dot{E}_1 = \dot{U}_{A0}, Z_0 = jX_0$$

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_{A0} - \dot{I} (jX_1 (a^2 + a) + jX_0)$$

$$= a^2 \dot{U}_{A0} - \dot{I} [j(X_0 - X_1)] = a^2 \dot{U}_{A0} - \left(\frac{X_0 - X_1}{2X_1 + X_0} \dot{U}_{A0} \right)$$

$$a^2 + a = -1$$





§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高

对于较大电源容量的系统, $Z_1 \approx Z_2$, 若再忽略各序阻抗中的电阻分量 R_0, R_1, R_2 则上式可改写成:

健全相工频电压升高的模:

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C$$

$$= \sqrt{3} \frac{\sqrt{\left(\frac{X_0}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{X_1}\right) + 1}}{\left(\frac{X_0}{X_1}\right) + 2} E$$

$$= K^{(1)} E$$

$$\begin{cases} \dot{U}_B = \left[-\frac{1.5 \frac{X_0}{X_1}}{2 + \frac{X_0}{X_1}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \dot{E}_A \\ \dot{U}_C = \left[-\frac{1.5 \frac{X_0}{X_1}}{2 + \frac{X_0}{X_1}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \dot{E}_A \end{cases}$$

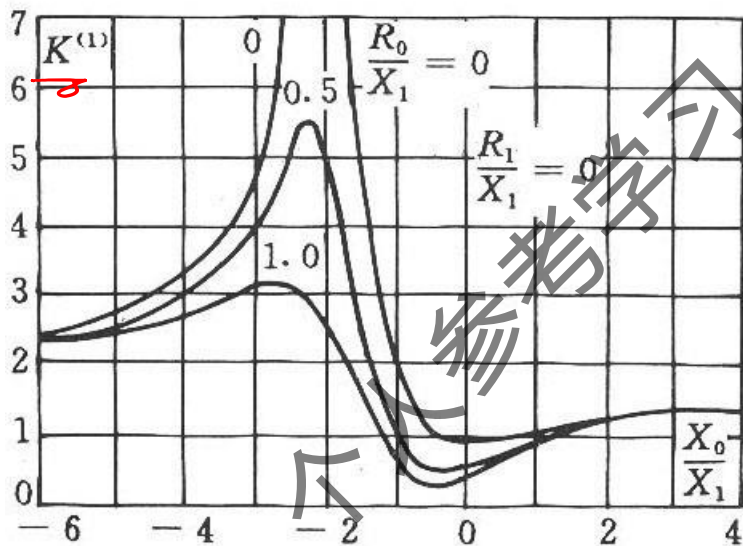


§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

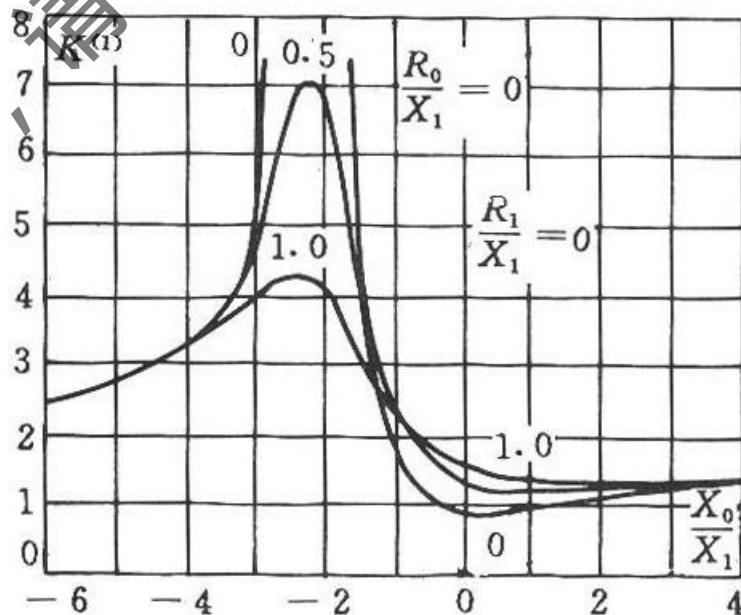
➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高

- 单相接地时，健全相电压升高 $K^{(1)}$ 与 X_0/X_1 值有关。
- 在不计损耗的前提下，一相接地，两健全相电压升高是相等的；若计及损耗，两健全相电压升高不相等。



(a) B相;

$X_0/X_1 = -2 \sqrt{3}$



(b) C相



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高

① 中性点不接地3-10 kV系统:

X_0 主要由线路容抗决定, 故应为负值($X_0/X_1 = (-20)/(-\infty)$).

$$K^{(1)} = \sqrt{3} \left| \frac{\sqrt{(-20)^2 + (-20) + 1}}{(-20) + 2} \right| = 1.08\sqrt{3} \leq 1.1\sqrt{3}$$

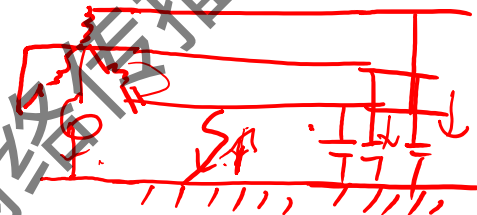
在选择避雷器灭弧电压时, 取 110% 的线电压, 这时避雷器称为110% 避雷器。



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高



② 中性点经消弧线圈接地的35-60 kV系统：

在过补偿状态运行时， X_0 为很大的正值，如取 $X_0/X_1 = \infty$ 。

ωL

$$K^{(1)} = \lim_{\frac{X_0}{X_1} \rightarrow \infty} \left[\sqrt{3} \frac{\sqrt{\left(\frac{X_0}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{X_1}\right) + 1}}{\left(\frac{X_0}{X_1}\right) + 2} \right] = \sqrt{3}$$

采用100% 避雷器。



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高

③ 中性点直接接地的110-220 kV系统：

X_0 为不大的正值。一般 $X_0/X_1 \leq 3$ ，因此，健全相上电压升高不大于80%的线电压，故采用80%的避雷器。

$$K^{(1)} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{3^2 + 3 + 1}}{3 + 2} = 0.72\sqrt{3} \leq 0.8\sqrt{3}$$

采用80% 避雷器，如考虑到长线效应，可采用90%避雷器。

※同一系统，运行方式不同时，若某一点发生单相接地时，从故障点看进去的零序阻抗与正序阻抗比值将不同，故单相接地系数 $K^{(1)}$ 也不是定值。一般情况下，“**大方式**”运行时单相接地系数大。



§1. 工频电压升高

■ 采用良导体地线降低输电线路的零序阻抗

- 故障点健全相电压的升高与由故障点看进去的零序阻抗 X_0 与正序阻抗 X_1 的比值有极大关系。
- 若采用**良导体地线**，可降低 X_0 ，进而降低由故障点看进去的零序、正序电抗的比值，达到限制工频过电压的目的。
- 计算表明，**电源容量愈大**，良导体地线降低工频过电压愈明显。



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

➤ ③ 突然甩负荷引起的工频电压升高

- 输电线路传送重负荷时，由于某种原因，断路器跳闸，电源突然甩负荷后，将在原动机与发电机内引起一系列机电暂态过程，它是造成线路工频电压升高的又一原因。
 - 当线路输送大功率（有功和感性无功）时，发电机的电势高于母线电压，甩负荷后，发电机激磁绕组中的磁通来不及变化，与其相应，电源电势 E'_d 维持原来的数值。
 - 线路末端断路器跳闸之后，空线仍由电源充电，电容效应造成工频电压升高。
 - 从机械过程来看，发电机突然甩掉一部分有功负荷，而原动机的调速器有一定惯性，在短时间内输入给原动机的功率来不及减少，主轴上有多余功率，这将使发电机转速增加。转速增加时，电源频率上升，不但发电机的电势随转速的增加而增加，而且加剧了线路的电容效应。

$$\frac{1}{\omega C} \quad \omega L \uparrow$$



§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的限制措施

➤ 限制工频电压升高的规定：

- 一般情况下，220kV及以下的电网中不需采取特殊措施限制工频电压升高。
- 在330kV，500kV，750 kV 系统中，工频电压升高对确定设备的绝缘水平起着重要的作用，应采取适当措施，将工频电压升高限制在一定水平之内。目前我国规定330kV，500kV，750 kV 系统，**母线上的暂态工频过电压升高不超过最高工作相电压的 1.3 倍，线路不超过 1.4 倍。**

➤ 通常采取以下方法加以限制：

- 利用并联电抗器补偿空载线路的电容效应
- 利用静止补偿装置 (SVC) 限制工频过电压
- 采用良导体地线降低输电线路的零序阻抗



暂时过电压

§1. 工频电压升高

§2. 谐振过电压

个人参考学习，请勿网络传播



§2. 谐振过电压

■ 原因

- 电力系统中存在着大量的“储能元件”，这就是储静电能量的电容和储磁能的电感。这些元件组成了各种不同的振荡回路，在正常运行时，这些振荡回路被负载所阻尼或分路，一般不会产生严重的振荡。但在发生故障时，系统接线方式和参数发生改变，就有可能发生谐振。

■ 危害

- 常常引起严重的、持续时间很长的过电压；有时即使过电压不太高，也会出现一些异常现象，使系统无法正常运行。

■ 类型：

- 线性谐振
- 参数谐振
- 铁磁谐振

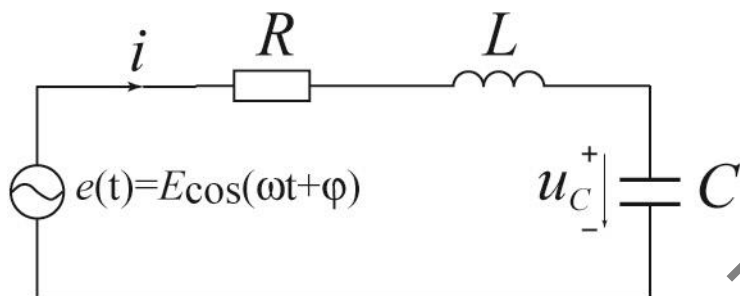
即1.4.2



§2. 谐振过电压

■ 线性谐振

- 系统中，等效回路的自振频率等于或接近电源频率时形成的谐振现象。



$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$u_C(t) = \frac{E}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\mu^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \times \cos(\omega t + \varphi - \delta)$$

$$\begin{cases} \mu = \frac{R}{2L} \\ \delta = \arctan \frac{2\mu\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \end{cases}$$



§2. 谐振过电压

■ 线性谐振

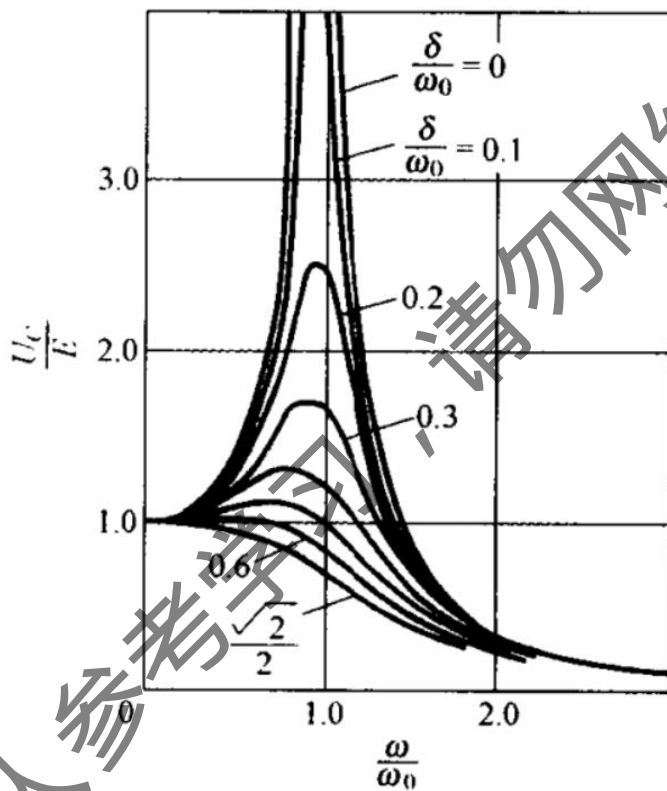


图 7-1-2 串联回路中电压稳态值
 U_C/E 与 ω/ω_0 的关系



§2. 谐振过电压

■ 线性谐振

- 实际电力系统中，往往可以在设计或运行时避开这种谐振，因此完全满足线性谐振的机会是极少的。但是，即使在接近谐振条件下，往往也会产生很高的过电压。
- 线性谐振过电压幅值受到回路中损耗（电阻）的限制；同时，在有些情况下，由于谐振时电流的急剧增加，回路中的铁磁元件趋向饱和，使系统自动偏离谐振状态而限制其过电压幅值。

§2. 谐振过电压

■ 参数谐振

- 系统中某些电感元件的电感参数在某种情况下会发生周期性的变化。在某种参数搭配下，就有可能产生谐振现象。

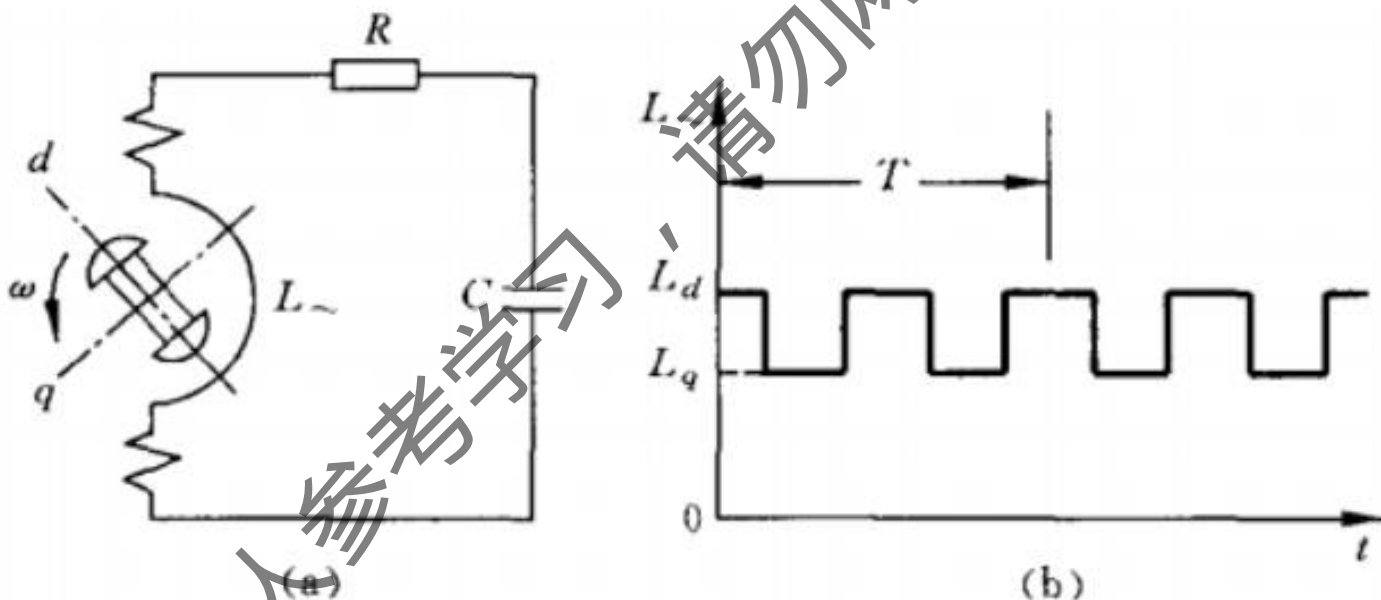


图 7-8-1 参数谐振电路及电感参数的变化曲线



§2. 谐振过电压

■ 参数谐振

电感变化 (-) $\xrightarrow{\text{磁链不能突变}}$ 电流变化 (+) \rightarrow 能量突增 (+)

电容能量 (+)

电感变化 (+) \rightarrow 电容能量不变

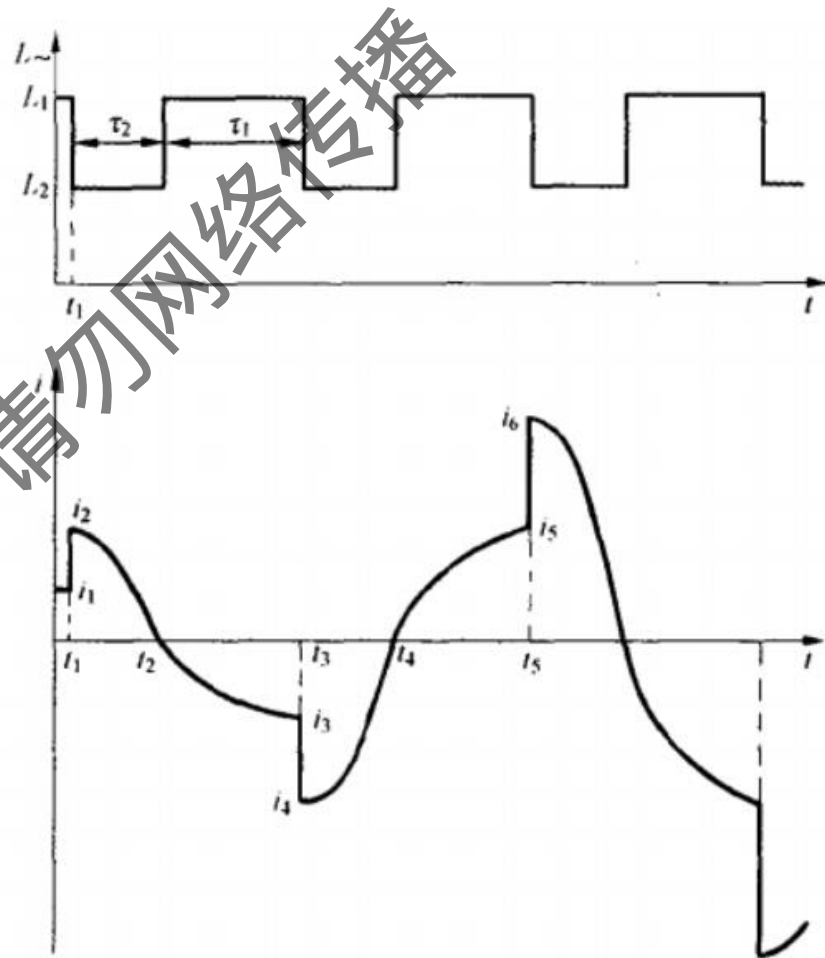


图 7-8-2 参数谐振的发展过程



§2. 谐振过电压

■ 参数谐振

- 参数谐振所需**能量来源于改变参数的原动机。**
- 当电感参数变化时所**引入的能量足以补偿回路中的损耗，**谐振不断发展。
- 对应于一定的回路电阻，有一定的**自激范围。**
- 谐振发生后，**理论上振幅趋向无穷大，**而不像线性谐振那样受到回路电阻的限制。但实际上电感的饱和会使回路自动偏离谐振条件，使过电压得以限制。



§2. 谐振过电压

■ 参数谐振

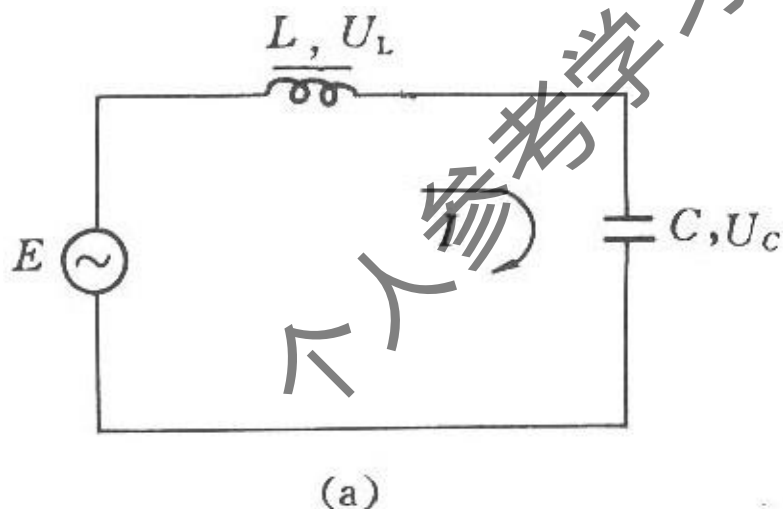
- 电感元件的电感参数周期性变化的典型：**发电机**
- 当发电机带有电容性负载，如一段空载线路，在某种参数搭配下，就有可能产生参数谐振现象。有时将这种现象称作**发电机的自励磁或自激**。
- 发电机投入电网运行前，设计部门要进行自激的校核，**一般正常情况下，参数谐振是不会发生的。**



§2. 谐振过电压

■ 铁磁谐振

- 电力系统中发生铁磁谐振的机会是相当多的。国内外运行经验表明，它是电力系统某些严重事故的直接原因。
- 电路中带有铁心的**电感元件**，会产生**饱和现象**，其电感不再是常数，而是随着电流或磁通的变化而变化。这种含有非线性电感元件的电路，在满足一定条件时，会发生铁磁谐振。



$$\begin{cases} u_L = \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi = f(i) \\ i = C \frac{du_C}{dt} \\ u_L + u_C = E \cos \omega t \end{cases}$$

§2. 谐振过电压

■ 铁磁谐振

- 电感 L 为非线性电感，要精确求解该电路，必须解非线性微分方程。当谐振发生时，回路中不仅仅有基频分量，还可能存在着高次谐波分量。简单分析该电路时，可忽略高次谐波分量，只考虑基频分量，把谐振下的电压和电流仍看作正弦波求解。

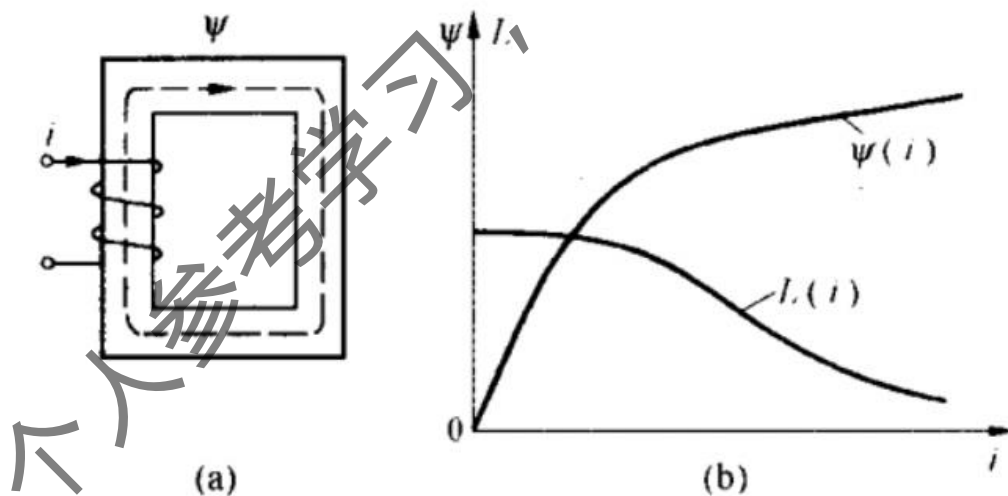


图 7-2-1 铁心元件的非线性特性

§2. 谐振过电压

■ 铁磁谐振

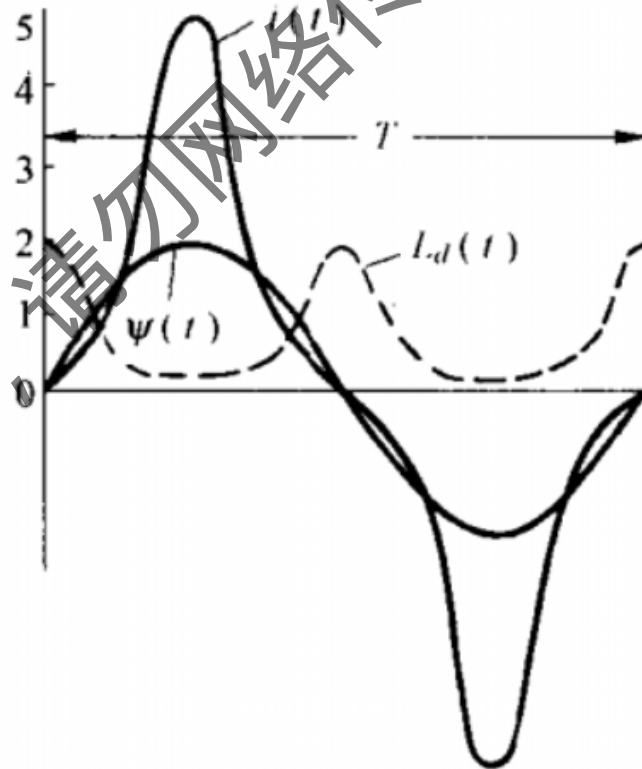
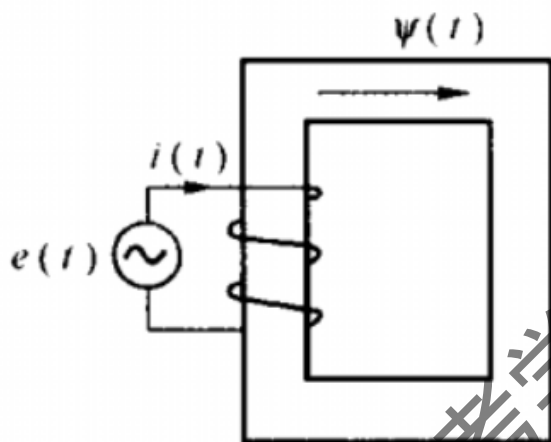


图 7-2-2 交流电源作用在铁心线圈上



§2. 谐振过电压

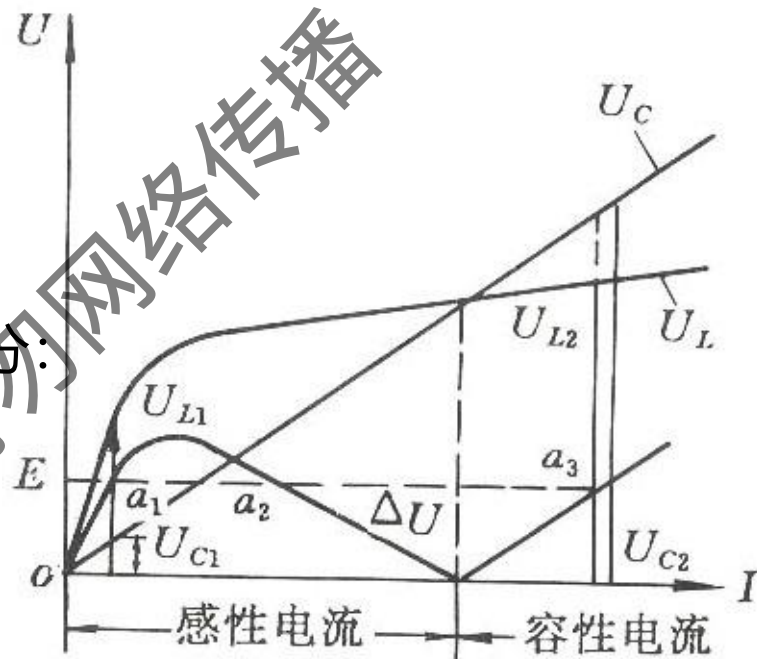
只考虑基频分量时:

$$\dot{E} = \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U}_L + \dot{I} \times \frac{1}{j\omega C}$$

电感电容串联回路伏安特性曲线可分为两部分:

电流小时 $\dot{U}_L > \dot{U}_C$ 感性电路

电流大时, 铁心开始饱和 $\dot{U}_L < \dot{U}_C$ 容性电路



(b)

回路的三个平衡点: a_1, a_2, a_3

a_1, a_3 是稳定平衡点, a_2 是不稳定平衡点, 它经不起任何的扰动, 在扰动下会趋向于 a_1 或 a_3 。



§2. 谐振过电压

铁磁谐振的发生：

a_1, a_3 是电路的稳定平衡点，当外加电势 E 从小增加时，系统首先稳定在 a_1 点。若此时继续增大 E ，则 a_1 点上移，以致于和 a_2 点重合，系统从点跳跃至 a_3 点。在跃变的过程中，电路发生如下现象：

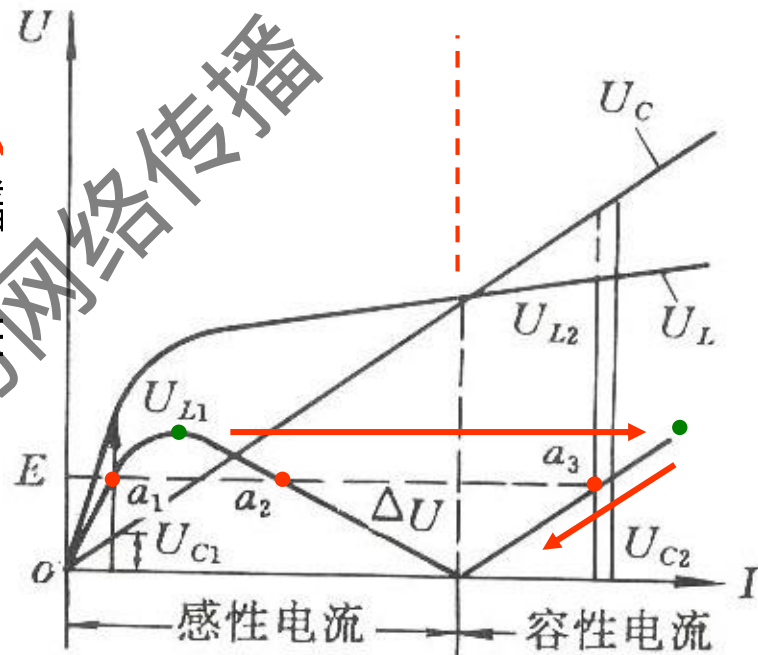
- ① 电感铁心饱和，回路电流急剧增大。
- ② 电容电压急剧增大
- ③ 系统由感性变为容性

铁磁谐振的“激发”条件：

为了建立起稳定的谐振点 a_3 ，回路必须经过强烈的扰动过程，例如发生故障，断路器跳闸，切除故障等。

铁磁谐振的“保持”：

在铁磁谐振的条件下，即使降低电压，铁磁谐振也不会马上消失。



§2. 谐振过电压

■ 断线引起的铁磁谐振

- 系统中性点位移
- 负载变压器相序反转
- 绕组电流急剧增加
- 导线有电晕声
- 严重时：绝缘闪络、避雷器爆炸

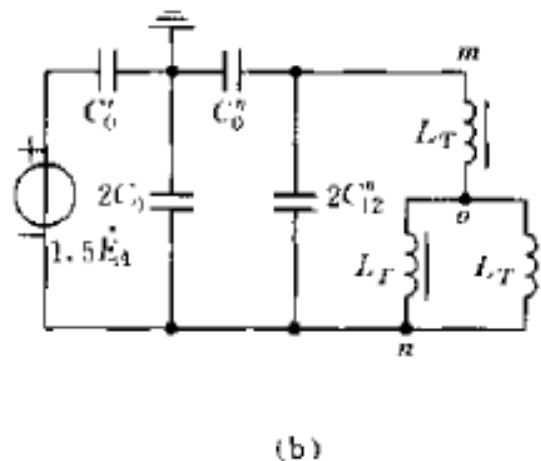
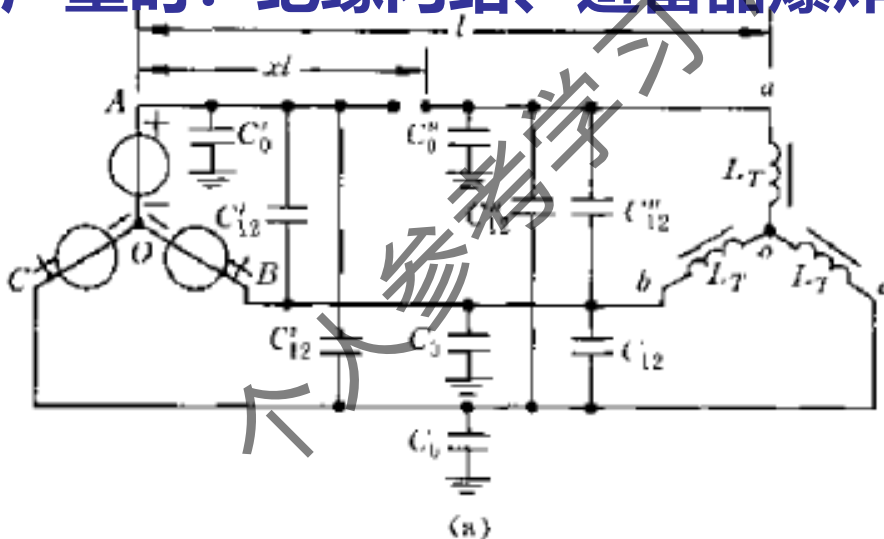


图 7-4-1 中性点绝缘系统单相断线电路图

§2. 谐振过电压

■ 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，出现明显的零序工频电压，在相邻输电线路或变压器绕组之间进行传递。
- 若与接在电源中性点的消弧线圈或PT等组成谐振回路，可能产生线性谐振或铁磁谐振传递过电压。

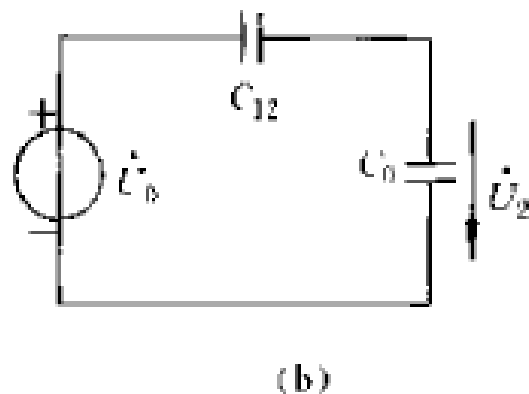
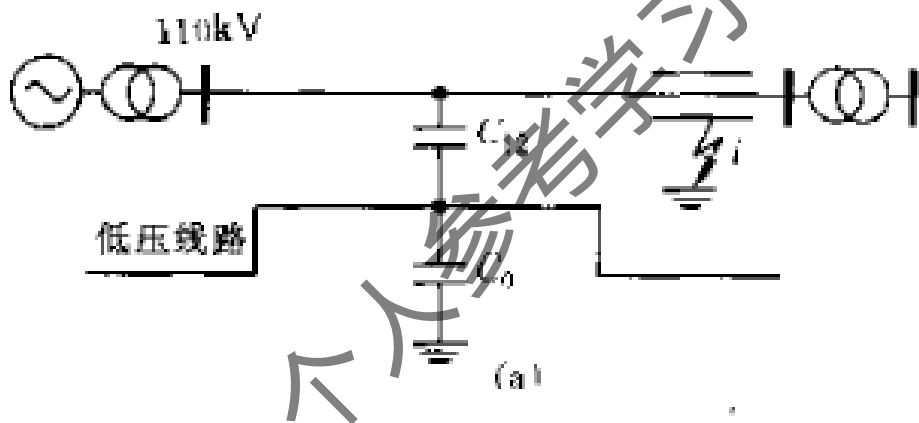


图 7-5-1 同杆并架线路的传递过电压



§2. 谐振过电压

■ 传递过电压

- 不论是否引起谐振，都是将一个电压等级的零序电压传递到另一个电压等级，造成后一系统中的“虚幻接地”，PT测到零序电压，发出接地指示。
- 针对性的措施：
 - 高压侧避免采用熔断器
 - 尽量避免高压断路器不同期操作
 - 对中性点直接接地系统中的中性点不接地变压器进行操作时，可以将变压器中性点临时接地
 - 在低压侧三相对地装设电容器组

§2. 谐振过电压

■ 分频谐振

- 理论上讲可以产生各种不同的分频谐振，但中性点绝缘系统最常见的是1/3分频谐振。
- 分频谐振不能自激，而要经过一定的过渡过程（合闸瞬间电容电压极性相反）的冲击才能建立起稳定的谐振。

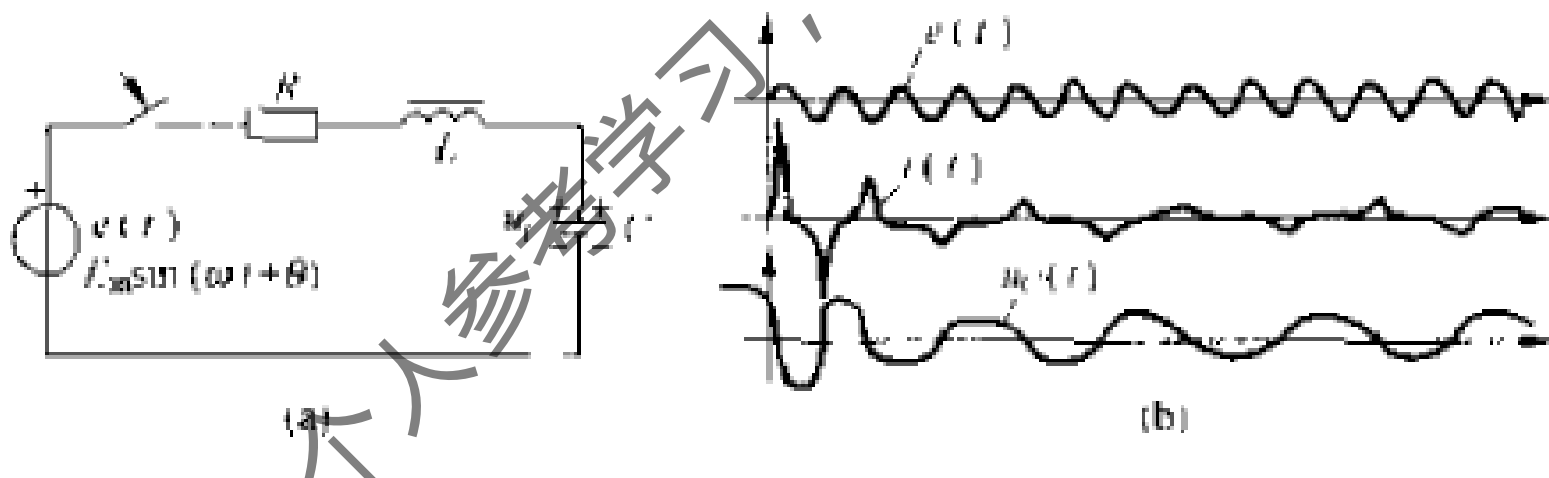


图 7-6-5 合闸后 1/3 次分频谐振的建立过程(合闸相角 $\theta = 320^\circ$)

§2. 谐振过电压

■ 分频谐振

- 常发生在串联谐振回路
- 过渡过程冲击由开关操作引入
- 可以通过给电抗器中性点串百欧级电阻抑制

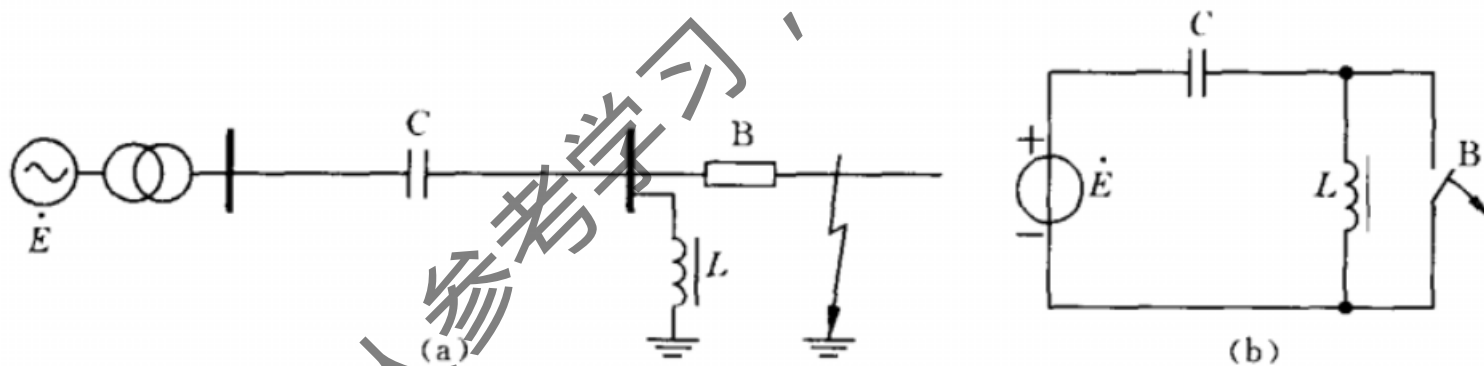


图 7-6-6 串联补偿电网中的分频谐振电路



§2. 谐振过电压

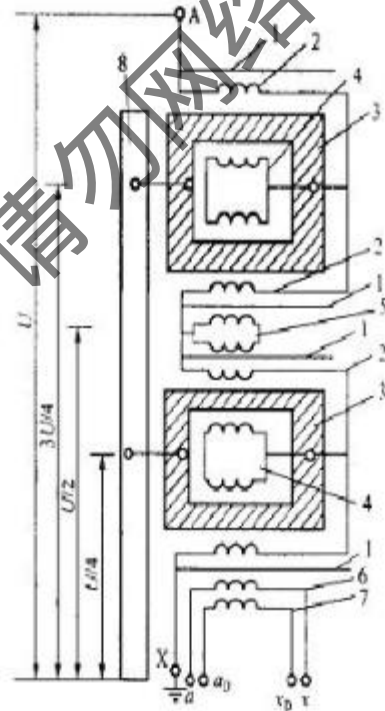
■ 电磁式电压互感器引起的谐振过电压

- 由于故障或操作使得系统遭受干扰，电磁式电压互感器绕组受激磁涌流的激发而饱和，由于三相绕组饱和程度的不同，三相导纳的数值和性质也不同，导致中性点位移，位移电压可能是工频的，也可能是谐波频率的。

§2. 谐振过电压

■ 电磁式电压互感器引起的谐振过电压

➤ 电磁式电压互感器 (PT)



1—静电屏蔽层; 2—一次绕组 (高压); 3—铁芯; 4—平衡绕组;

5—连耦绕组; 6—二次绕组; 7—剩余二次绕组; 8—支架



§2. 谐振过电压

■ 电磁式电压互感器引起的谐振过电压

➤ 发生条件

- 系统电源中性点对地绝缘
- 互感器一次绕组中性点直接接地
- 具有一定的外界激发条件

➤ 特点

- 对地绝缘的电源中性点位移电压使得相对地出现过电压
- 电源中性点位移电压可以是基波，也可以是分频或高频的。
- 一般很少超过 $3.5U_{ph}$
- 分频谐振危害大（激磁电流大为增加）

§2. 谐振过电压

■ 电磁式电压互感器引起的谐振过电压

➤ 限制方法

- 选用激磁特性较好的电磁式互感器，或使用电容式电压互感器
- 在零序回路中接入阻尼电阻
 - 在PT开口三角形绕组中短时接入电阻
 - 在PT一次绕组中性点对地接入电阻

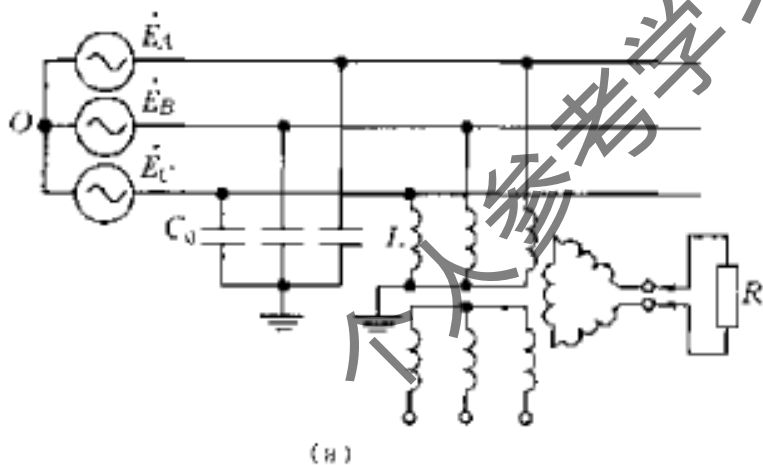


图 7-7-7 电压互感器一次绕组中性点经电阻接地



§2. 谐振过电压

■ 小结

➤ 基波的铁磁谐振有下列特点

- 产生串联铁磁谐振的必要条件是：电感和电容的**伏安特性必须相交**
- 对铁磁谐振电路，在同一电源电势作用下，回路可能有不只一种稳定工作状态。在外界激发下，回路可能从非谐振工作状态跃变到谐振工作状态，电路从感性变为容性，**发生相位反倾**，同时产生过电压与过电流
- 铁磁元件的**非线性是产生铁磁谐振的根本原因**，但其饱和特性本身又限制了过电压的幅值，此外，回路中**损耗，也能使过电压降低**，当回路电阻值大到一定数值时，就不会出现强烈的谐振现象



§2. 谐振过电压

■ 可能参与铁磁谐振的元件：

➢ 电感

- 空载变压器或轻载变压器的激磁电感、消弧线圈的电感、电磁式电压互感器的电感等。

➢ 电容

- 导线的对地电容、相间电容以及电感线圈对地的杂散电容等。

■ 限制措施

- 改善电磁式电压互感器的激磁特性，或改用电容式电压互感器。
- 在电压互感器开口三角绕组中接入阻尼电阻，或在电压互感器一次绕组的中性点对地接入电阻。
- 在有些情况下，可在10kV及以下的母线上装设一组三相对地电容器，或用电缆段代替架空线段，以增大对地电容，从参数搭配上避免谐振。
- 特殊情况下，可将系统中性点临时经电阻接地或直接接地，或投入消弧线圈，也可以按事先规定投入某些线路或设备以改变电路参数，消除谐振过电压。

§2. 谐振过电压



消谐电阻



微机型消谐装置界面

§2. 谐振过电压

■ 电容式电压互感器

