



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

4.3 电力系统暂时过电压 Temporary Overvoltage

2020年02-05月





4.3 暂时过电压

§1. 工频电压升高

§2. 谐振过电压

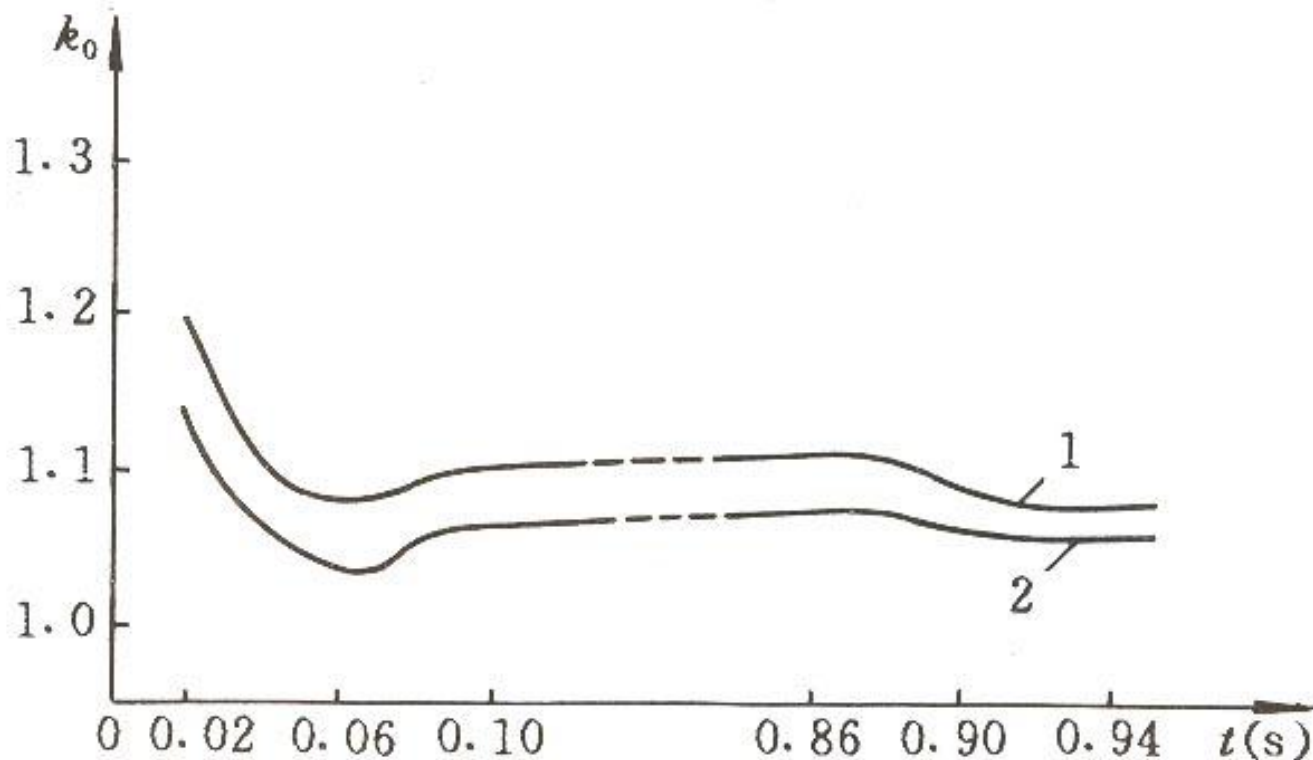


§1. 工频电压升高

■ 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

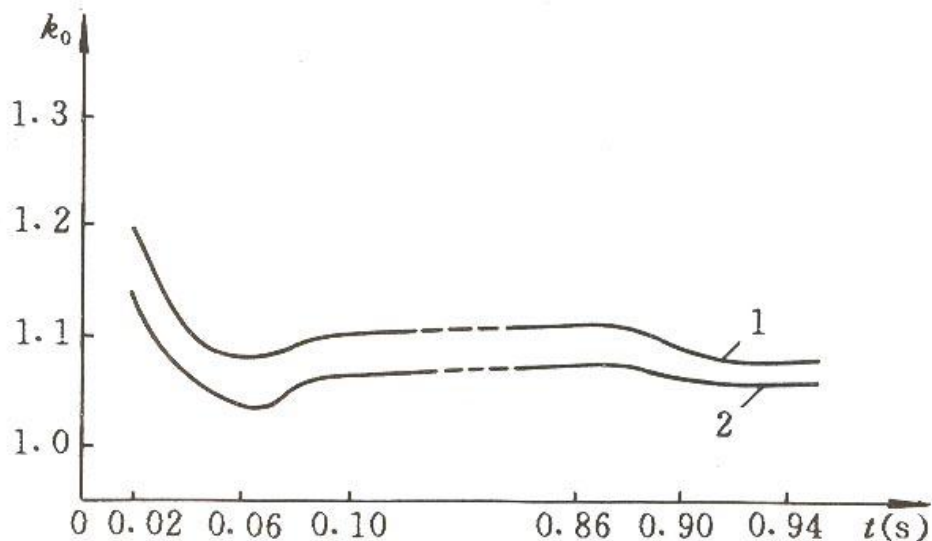
§1. 工频电压升高



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

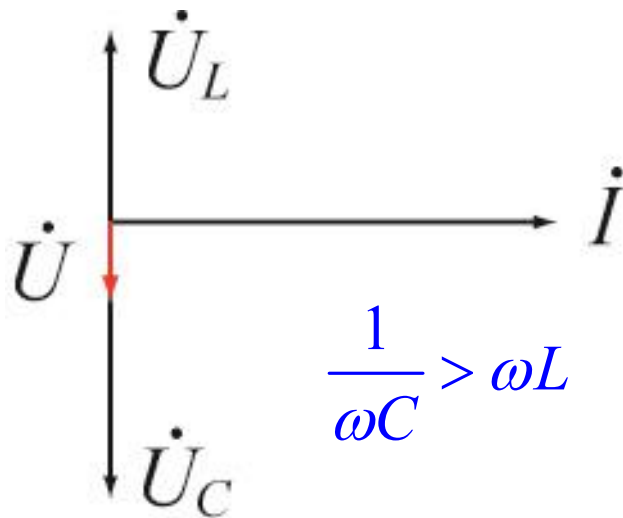
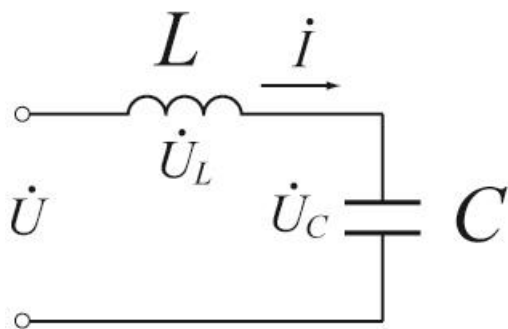
■ 工频电压升高的原因

- 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



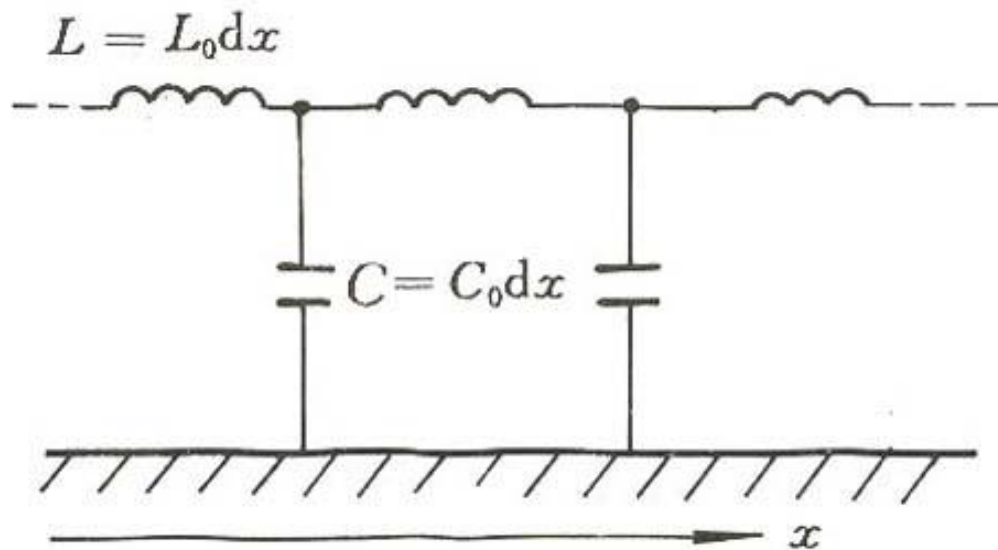
集中参数LC串联回路的电容效应



§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

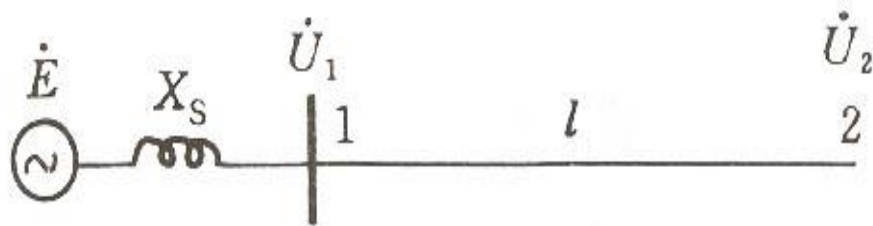


一条空载长线可以看作由无数个串联的 L , C 回路构成, 在工频电压作用下, 线路的总容抗一般远大于导线的感抗, 因此线路各点的电压均高于线路首端电压, 而且愈往线路末端电压愈高。

§1. 工频电压升高



■ 电压传递系数



输电线路为无损长线

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

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

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：

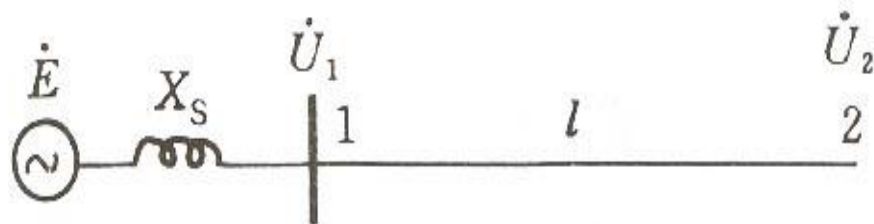
$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 / \cos \alpha' l$$

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

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。



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

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

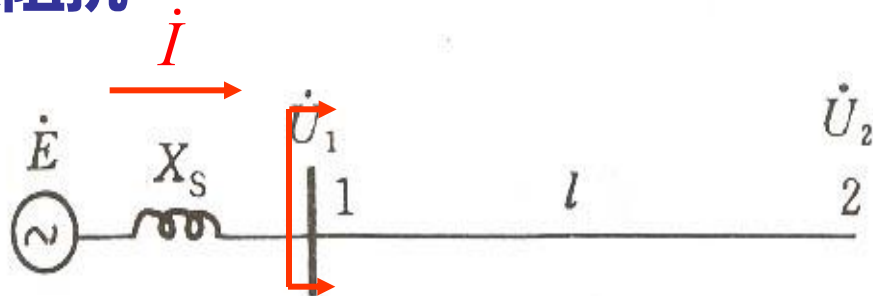
此时，线路电感与电容构成谐振状态。称为1/4 波长谐振。



§1. 工频电压升高

■ 电压传递系数

➤ 考虑电源阻抗



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

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

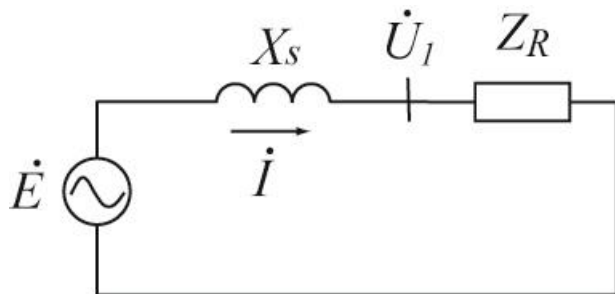
$$\begin{bmatrix} \dot{E} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha' l & jZ \sin \alpha' l \\ j \frac{\sin \alpha' l}{Z} & \cos \alpha' l \end{bmatrix}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



§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



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

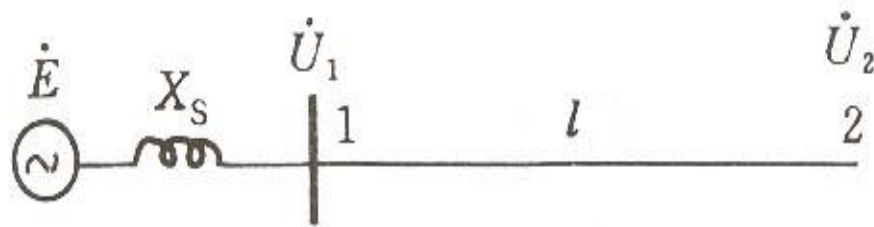
$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E}}{jX_s + Z_R} Z_R = \frac{\dot{E}}{X_s - Z \cot \alpha' l} (-Z \cot \alpha' l)$$



§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  $K_{02} = \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha' l + \varphi)}$



§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

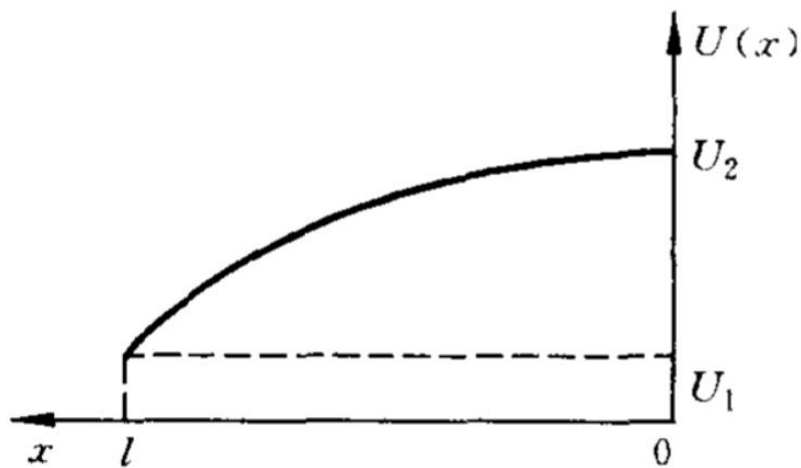


图 5-1-3 空载无损长线电压分布

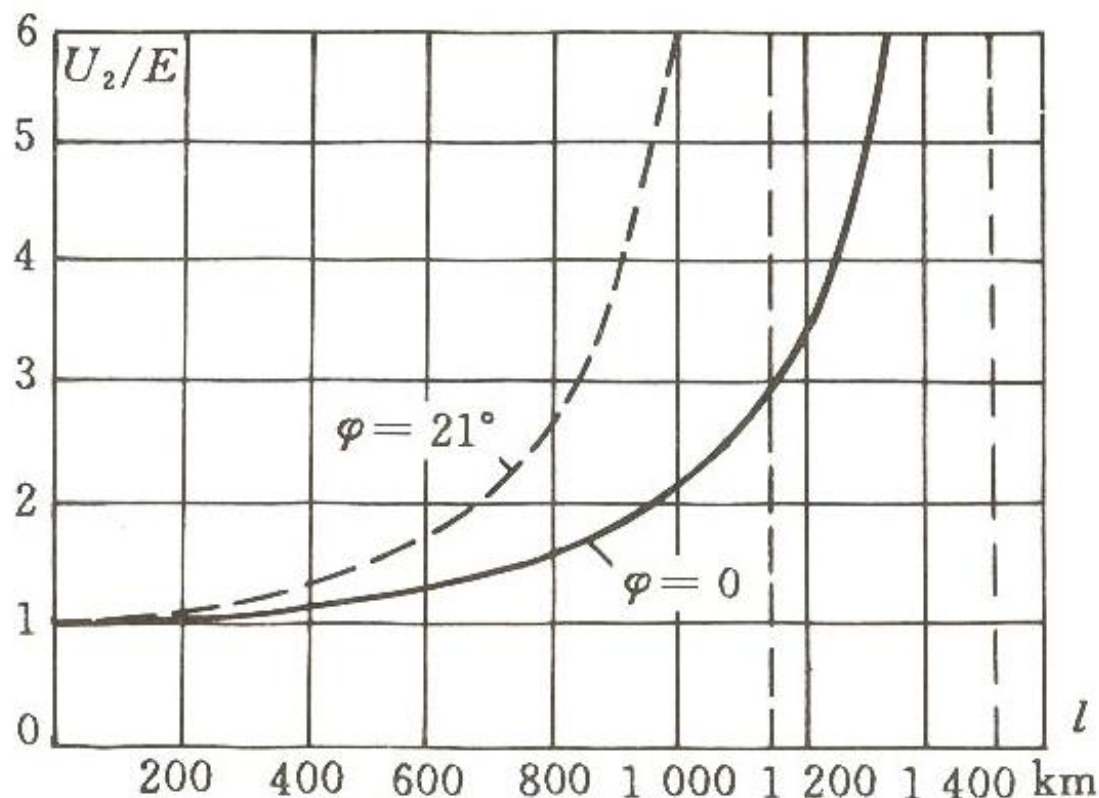
从线路末端到首端呈余弦分布



§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

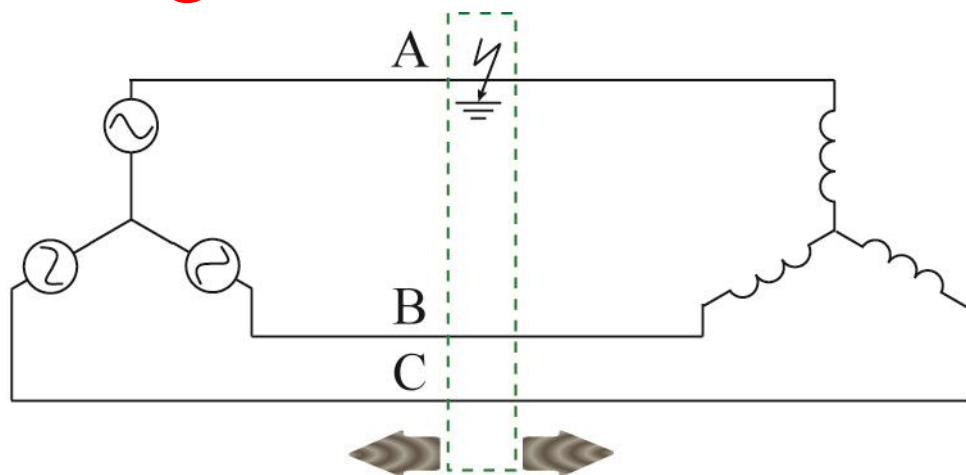
★ 工频电压升高的情况可能与线路长度，电源阻抗(电源容量)等情况有关，因为电源容量越小，其阻抗越大，故计算工频电压升高时，必须计及系统可能出现最小运行方式。



§1. 工频电压升高

■ 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

a 为 $e^{j\frac{2}{3}\pi}$

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；



§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：

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

健全相工频电压升高的模：

$$\begin{aligned} U_B &= U_C \\ &= \sqrt{3} \frac{\sqrt{\left(\frac{X_0}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{X_1}\right) + 1}}{\left(\frac{X_0}{X_1}\right) + 2} E \\ &= K^{(1)} E \end{aligned}$$

单相接地系数，单相接地故障时，健全相对地最高工频电压有效值与故障前故障相对地电压有效值之比

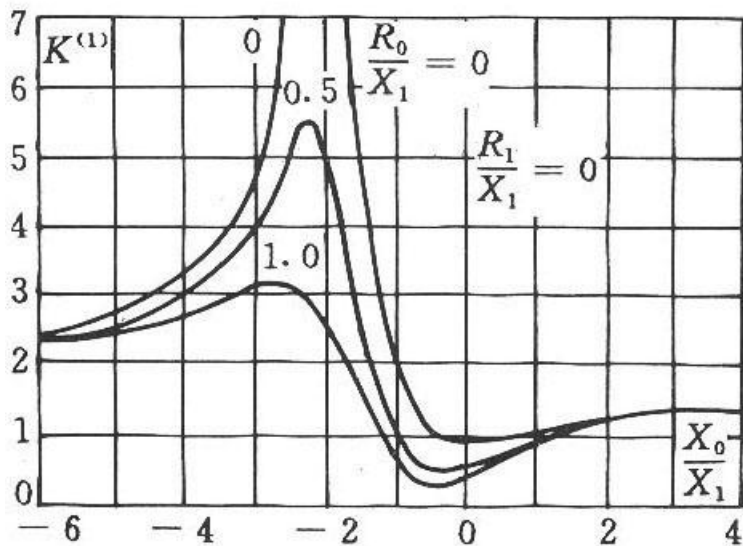


§1. 工频电压升高

■ 工频电压升高的原因

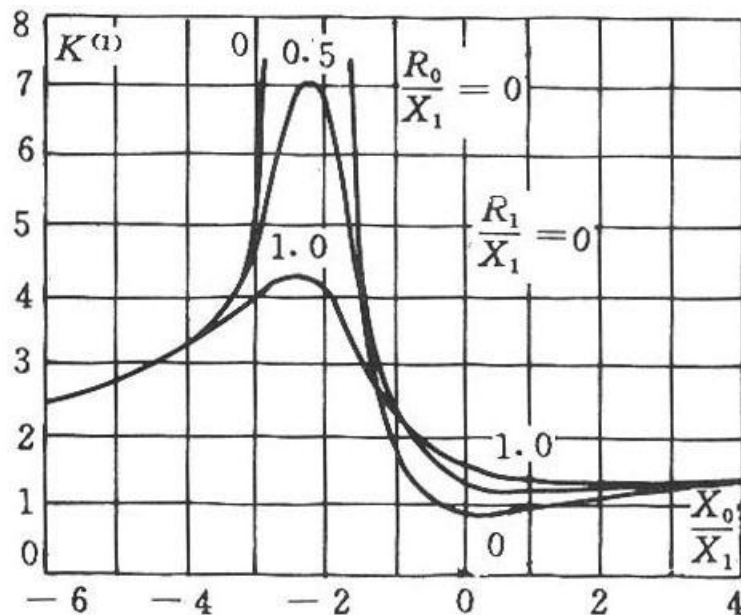
➤ ② 不对称短路引起的工频电压升高

- 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)

(a) B相; (b) C相



(b)



§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 $X_0/X_1 = \infty$ 。

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

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

■ 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。



§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。**

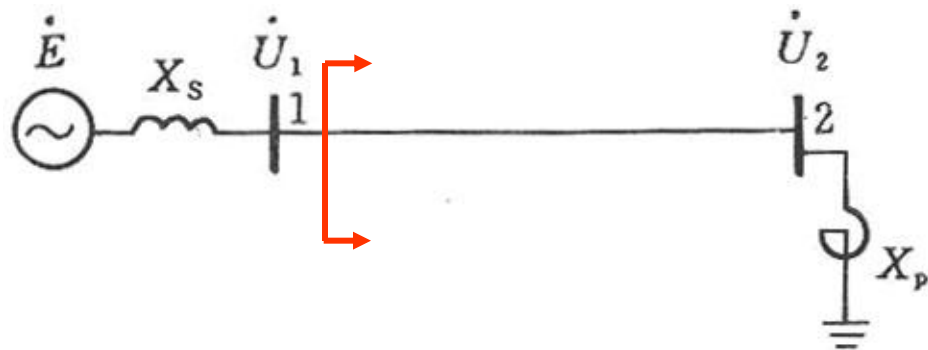
➤ 通常采取以下方法加以限制：

- 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



§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



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

无损长线的方程

无损线路末端接有并联电抗器

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

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



§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

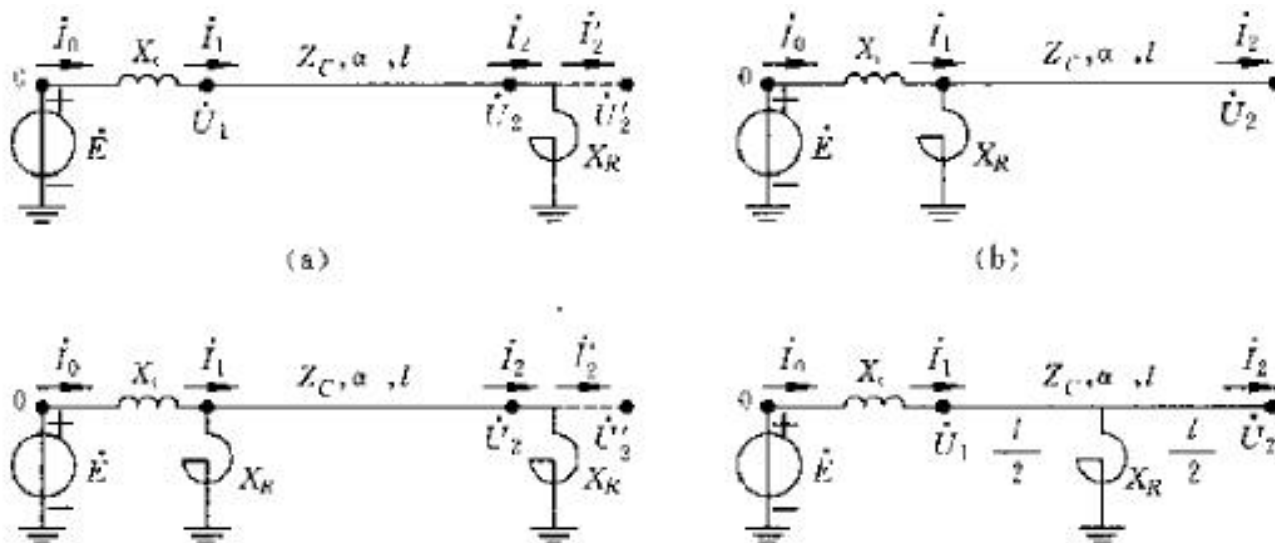


图 5-4-1(a)

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

图 5-4-1(b)

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

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

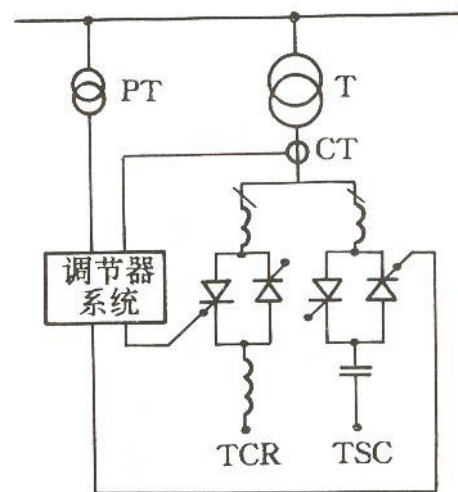


■ 利用静止补偿装置 (SVC) 限制工频过电压

- 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



- 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。



§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



§2. 谐振过电压

➤ 线性谐振

- 电路中的电感为常数，在交流电源作用下，回路的自振频率等于或接近电源频率时，产生谐振

线路电抗 变压器漏抗等

➤ 参数谐振

- 元件的电感参数在外力的影响下发生周期性的变化，与电容配合不当
时，发生谐振

发电机 电动机等

➤ 铁磁谐振

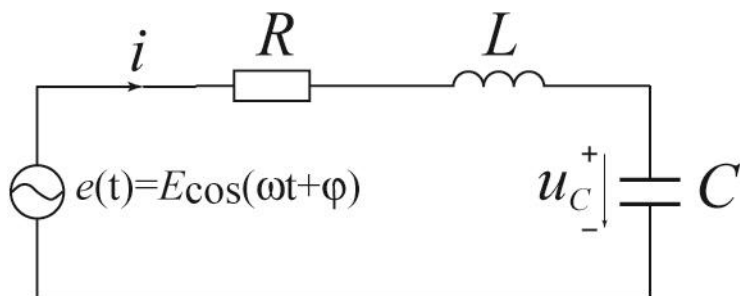
- 电感参数随着电流或磁通变化而变化，满足一定条件时发生谐振
带铁芯的电抗在铁芯饱和



§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。



$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{忽略电阻时的自振角频率}$$

$$u_C(t) = \frac{E}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\frac{\mu^2}{\omega_0^2} \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \times \cos(\omega t + \varphi - \delta)$$
$$\begin{cases} \mu = \frac{R}{2L} & \text{回路阻尼率} \\ \delta = \arctan \frac{2\mu\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \end{cases}$$



§2. 谐振过电压

■ 线性谐振

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

当回路满足谐振条件时，若R趋于0，则电流趋于无穷大，电感电容上的电压也趋于无穷大

因此，R是限制谐振过电压的唯一因素，定义阻尼率

$$\mu = \frac{R}{2L}$$

$$U_C = \frac{U_m}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\mu\omega}{\omega_0^2}\right)^2}}$$

$$U_C = U_m \cdot \frac{\omega}{2\mu} = \frac{U_m}{R} \cdot \omega L = \frac{U_m}{R} \cdot \frac{1}{\omega C}$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \sqrt{1 - \frac{2\mu^2}{\omega_0^2}}$$

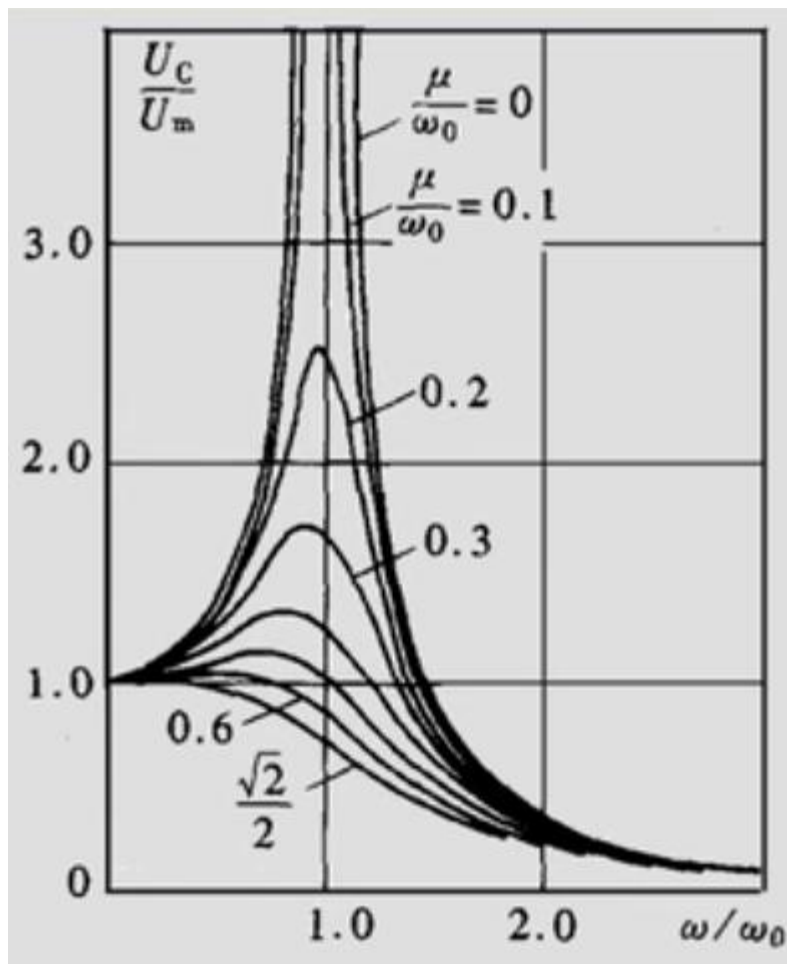
Uc有最大值

$$U_{C\max} = \frac{U_m}{\frac{2\mu}{\omega_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{\omega_0}\right)^2}}$$



§2. 谐振过电压

■ 线性谐振





§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。

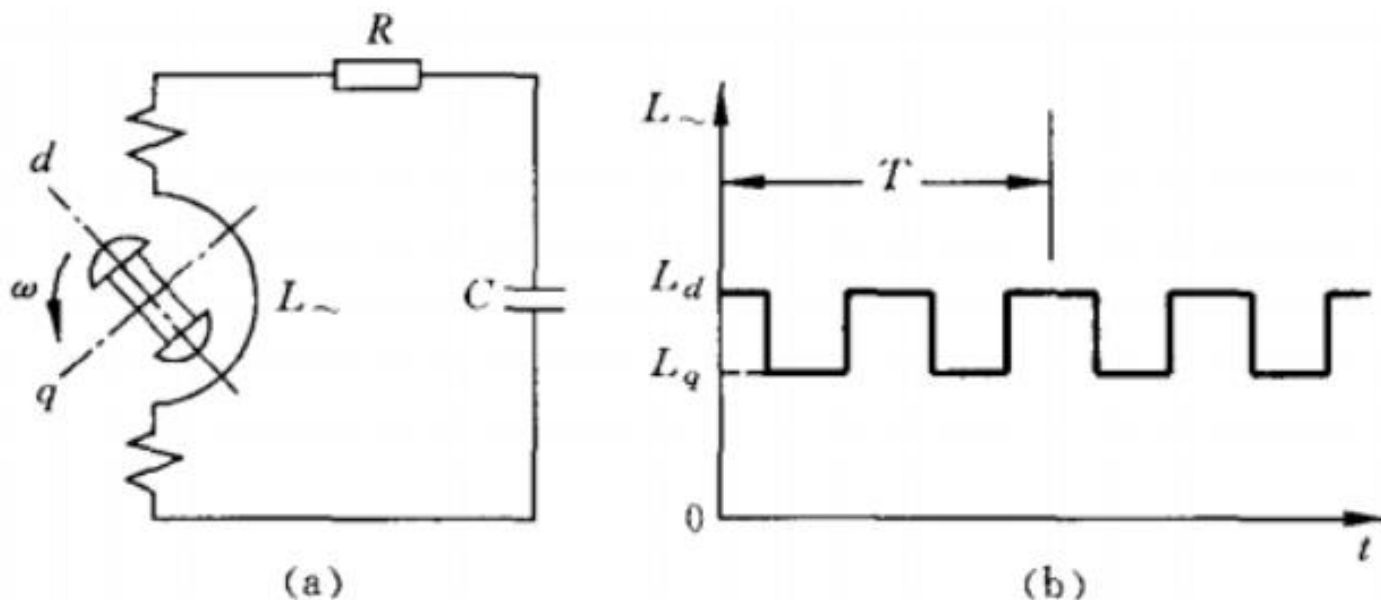


图 7-8-1 参数谐振电路及电感参数的变化曲线



§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

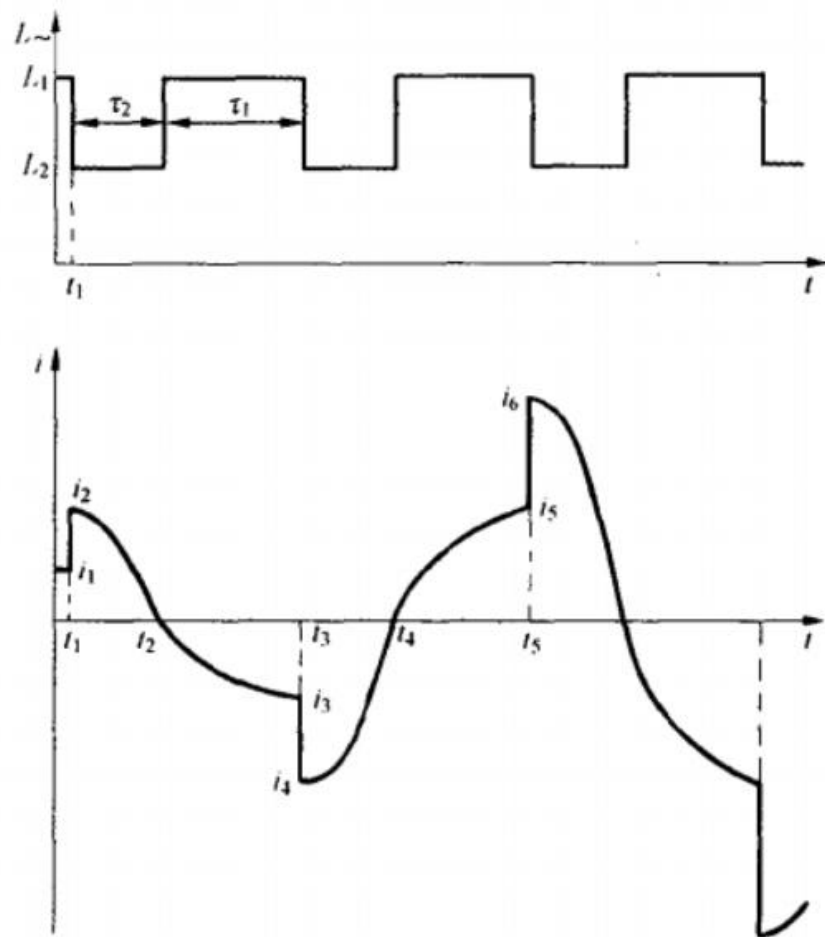


图 7-8-2 参数谐振的发展过程



§2. 谐振过电压

■ 参数谐振

- 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

■ 参数谐振

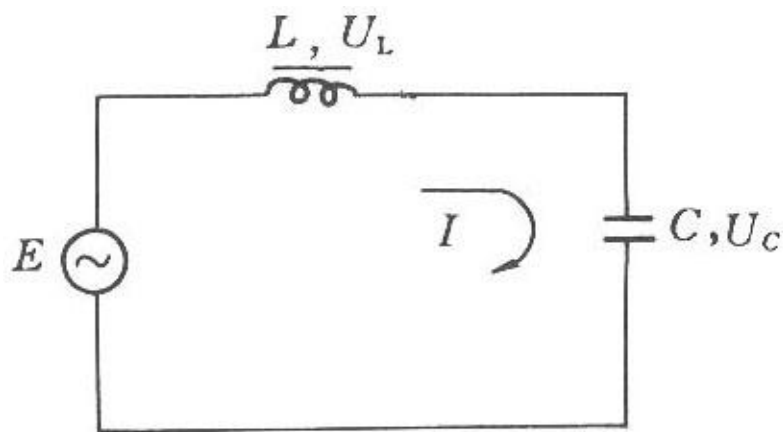
- 参数谐振所需**能量来源于改变参数的原动机。**
- 当电感参数变化时所**引入的能量足以补偿回路中的损耗，**谐振不断发展。
- 对应于一定的回路电阻，有一定的自激范围。
- 谐振发生后，**理论上振幅趋向无穷大，**而不像线性谐振那样受到回路电阻的限制。但实际上电感的饱和会使回路自动偏离谐振条件，使过电压得以限制。



§2. 谐振过电压

■ 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。**未饱和之前，感抗大于容抗**



(a)

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

§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。

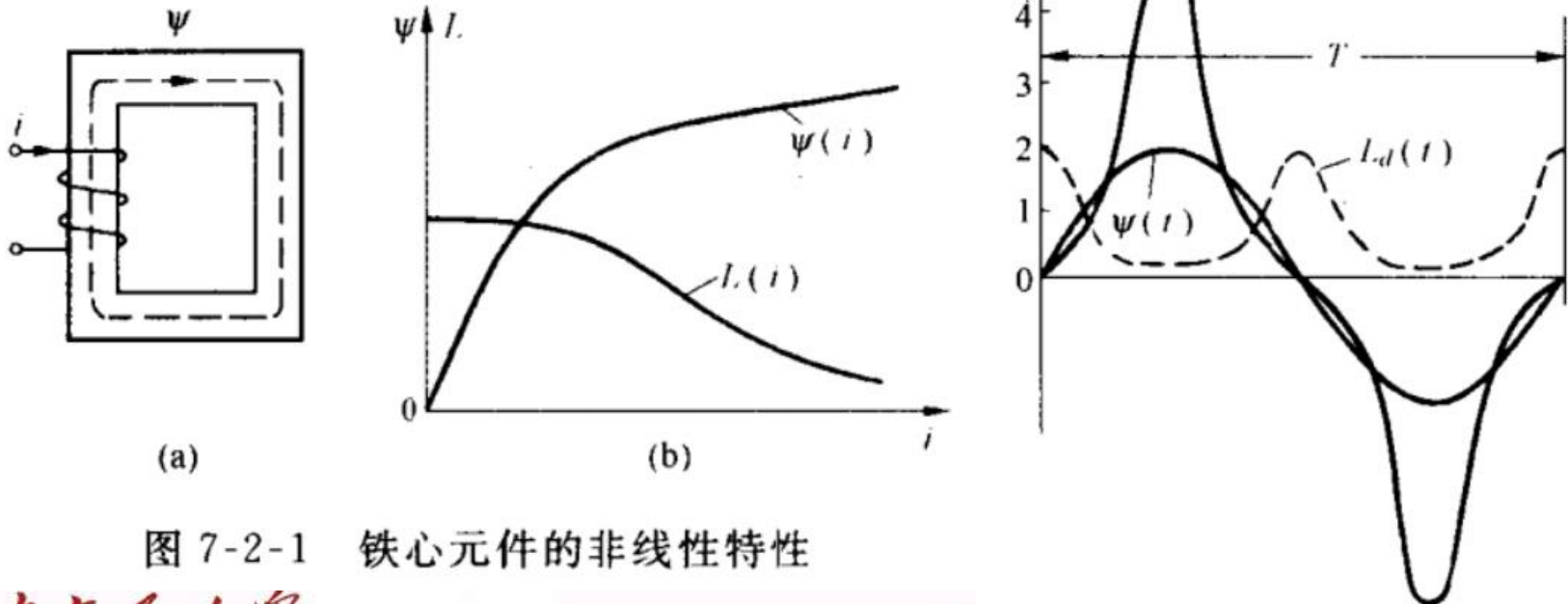


图 7-2-1 铁心元件的非线性特性

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

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



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 。

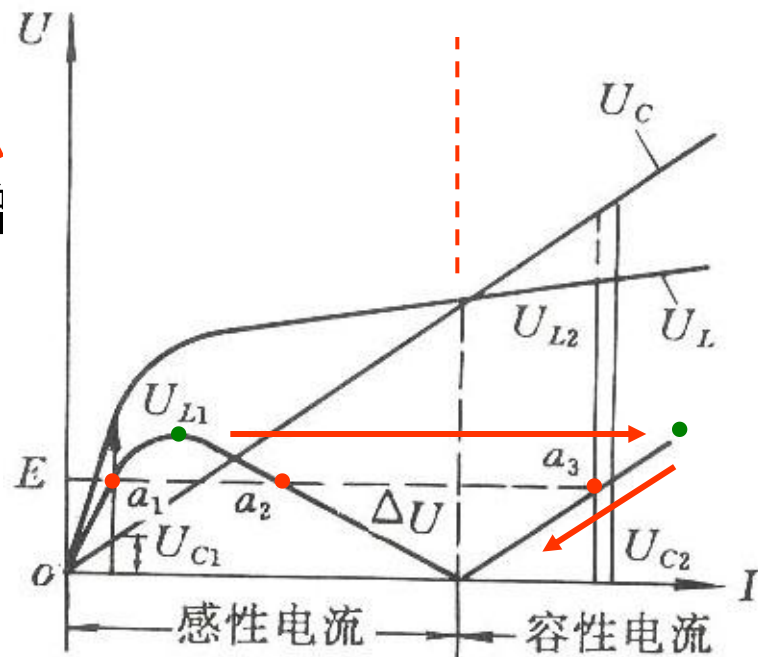


S2. 谐振过电压

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 a_1 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

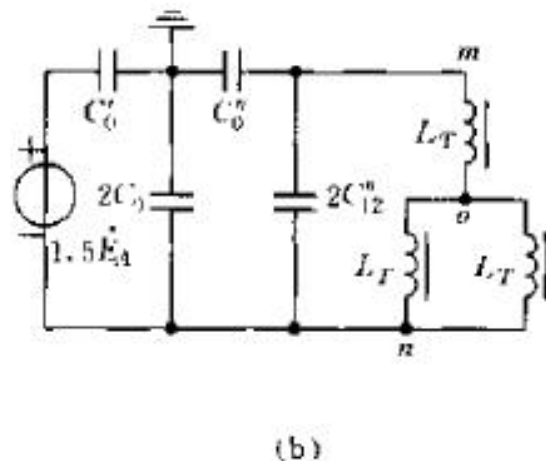
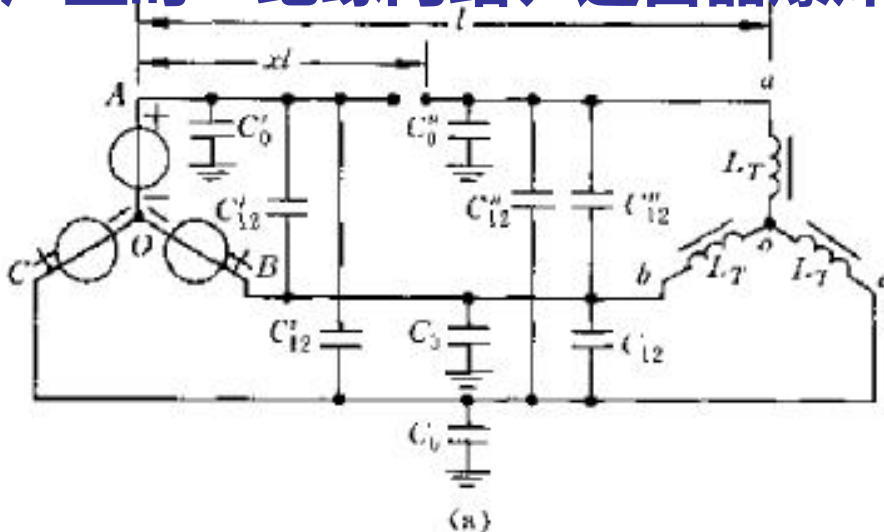


图 7-4-1 中性点绝缘系统单相断线电路图



§2. 谐振过电压

■ 断线引起的铁磁谐振

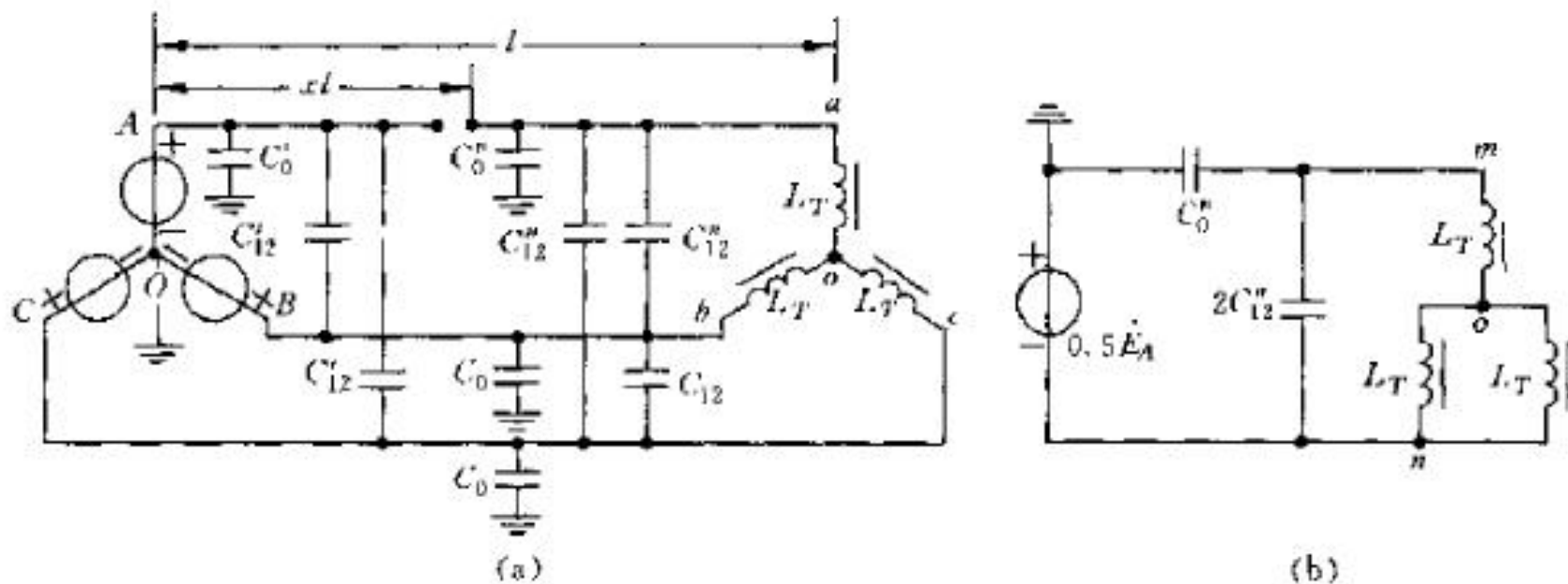


图 7-4-3 中性点直接接地系统单相断线电路图



§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。