


第五章 导体和电气设备的原理与选择




第一节 电气设备选择的一般条件

第二节 高压断路器和隔离开关的选择

第三节 互感器的原理及选择

第四节 限流电抗器、熔断器、导体选择*

第五章 导体和电气设备的原理与选择



第一节 电气设备选择的一般条件

第二节 高压断路器和隔离开关的选择

第三节 互感器的原理及选择

第四节 限流电抗器、熔断器、导体选择*

1.1 概述

1、电气设备选择的基本要求

■ 现实情况:

- 电力系统中各类电气设备种类繁多
- 电气设备的作用和工作条件并不相同
- 对其可靠性的基本要求是一致的

■ 电气设备选择的步骤:

- 先按正常工作条件进行选择
- 然后按短路状态进行校验（热、动稳定校验）



1.2 按正常工作条件选择电气设备

1、额定电压

■ 电网的最高运行电压的出现:

- 由于调压而升高
- 由于负荷变化而升高
- 不能超过电网额定运行的1.15倍

■ 电气设备的选择原则:

- 设备的额定电压不小于安装点的电网额定电压 $U_N \geq U_{SN}$
- 设备允许的最高电压为设备额定电压的1.15倍



1.2 按正常工作条件选择电气设备

2、额定电流

■ 额定电流:

- I_N 是指在额定环境温度下, 电气设备的长期允许电流
- I_N 应不小于该回路各种合理运行方式下的最大持续工作电流 I_{\max}

$$I_N \geq I_{\max}$$

■ 不同电气设备的 I_{\max} 不同:

- 发电机、调相机回路 $I_{\max} = 1.05 I_{GN}$
- 变压器回路, 按变压器有过负荷确定 $I_{\max} = 1.3 \sim 2 I_{GN}$
- 母联断路器回路的 I_{\max} 一般可取母线上最大一台发电机或变压器的 I_{\max}



1.2 按正常工作条件选择电气设备

3、环境条件对设备选择的影响

当电气设备安装地点的环境条件如温度、风速、污秽等级、海拔高度、地震烈度和覆冰厚度等超过一般电气设备规定的使用条件时，应采取措施。

■ 海拔高度的影响：

- 一般非高原型的电气设备使用环境的海拔高度不超过1000m；
- 海拔在1000~3500m时，海拔每升高100m，允许的额定电压下降1%；
- 当最高允许工作电压不能满足要求时，应采用高原型电气设备，或采用外绝缘提高一级的产品。



1.2 按正常工作条件选择电气设备

3、环境条件对设备选择的影响

■ 环境温度的影响：

- 电气设备的额定电流是指在基准环境温度下，能允许长期通过的最大工作电流，此时电气设备的长期发热温升不超过其允许温度；
- 我国生产的电气设备一般使用的额定环境温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ ；
- 当周围环境温度在 $+40\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，其允许电流一般按每升高 1°C ，额定电流减少1.8%进行修正；
- 当环境温度小于 $+40^{\circ}\text{C}$ 时，温度每下降 1°C ，允许电流可增加0.5%，但最大电流不能超过额定电流的20%。



1.3 按短路状态校验

1、短路热稳定校验

- **定义：**短路电流通过时，电气设备各部件温度（或发热效应）应不超过允许值

- **条件：** $I_t^2 t \geq Q_k$
 - I_t 、 t — 电气设备允许通过的热稳定电流和时间
 - Q_k — 短路电流产生的热效应



1.3 按短路状态校验

2、电动力稳定校验

- **定义：**电气设备承受短路电流机械效应的能力
- **满足条件：** $i_{es} \geq i_{sh}$ 或 $I_{es} \geq I_{sh}$
 - i_{es} 、 I_{es} 为电气设备允许通过的动稳定电流幅值及其有效值；
 - i_{sh} 、 I_{sh} 为短路冲击电流幅值及其有效值。
- **特殊情况下，无需校验：**
 - 用熔断器保护电气设备，可不验算热稳定；
 - 采用限流电阻的熔断器保护设备可不校验动稳定；
 - 装设在电压互感器回路中的裸导体和电气设备可不验算动、热稳定。

1.4 短路电流计算条件

1、容量和接线

- **容量：**按本工程设计最终容量计算，并考虑电力系统远景发展规划
- **接线：**采用可能发生最大短路电流的正常接线方式

2、短路种类

- 一般按三相短路验算，若其他种类短路较三相短路严重时，则应按最严重的情况验算



1.4 短路电流计算条件

3、计算短路点

- **要求：**在校验电气设备和载流导体时，必须确定电气设备和载流导体处于最严重的短路点，使通过的短路电流校验值为最大。
 - 两侧均有电源的断路器，应比较断路器前、后短路时通过断路器的电流值，择其大者为计算短路点；
 - 母联断路器应考虑当采用该母联断路器向备用母线充电时，备用母线故障流过该备用母线的全部短路电流；
 - 带电抗器的出线回路，一般可选电抗器后为计算短路点（这样出线可选用轻型断路器）。



1.4 短路电流计算条件

4、短路计算时间

■ 热稳定短路计算时间 t_k :

$$t_k = t_{pr} + t_{br} = t_{pr} + t_{in} + t_a$$

t_{pr} → 继电保护动作时间 (后备保护)
 t_{br} → 断路器全开断时间
 t_{in} → 断路器固有分闸时间
 t_a → 燃弧时间

■ 短路开断计算时间 t'_k :

$$t'_k = t_{pr1} + t_{in}$$

t_{pr1} → 继电保护动作时间 (主保护)
 t_{in} → 断路器固有分闸时间

第五章 导体和电气设备的原理与选择



第一节 电气设备选择的一般条件

第二节 高压断路器和隔离开关的选择

第三节 互感器的原理及选择

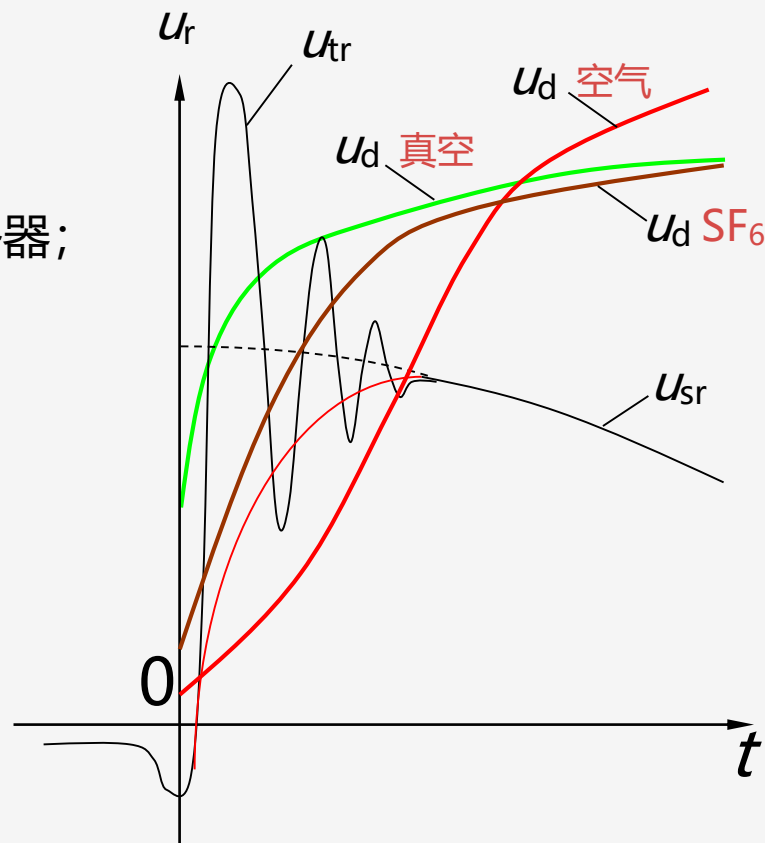
第四节 限流电抗器、熔断器、导体选择*

2.1 高压断路器的选择

1、断路器种类和型式

■ 按灭弧介质和灭弧方式分类：

- 油断路器：包括多油/少油断路器；
- 压缩空气断路器；
- SF₆断路器；
- 真空断路器



2.1 高压断路器的选择

2、开断电流选择

■ **高压断路器的开断电流 I_{Nbr} ：**在额定电压下能保证正常开断的最大短路电流。

- 对于中小型发电厂、变电站中，通常采用慢速断路器（开断时间 $\geq 100\text{ms}$ ），短路电流非周期分量衰减较多，可不计非周期分量影响，采用起始次暂态电流 I'' 校验：

$$I_{Nbr} \geq I''$$

- 在大型发电厂（125MW以上）以及枢纽变电站采用快速和高速断路器（开断时间 $< 100\text{ms}$ ），短路电流的非周期分量不容忽视：

$$\begin{cases} I_{Nbr} \geq I'_k \\ I'_k = \sqrt{I_{pt}^2 + \left(\sqrt{2}I''e^{-\omega t'_k/T_a} \right)^2} \end{cases}$$



2.1 高压断路器的选择

3、发电机断路器的特殊要求

■ 额定值的要求

相比较相同电压等级的输配电断路器，发电机断路器要求承载的额定电流特别高，开断的短路电流特别大。

■ 开断性能的要求

应具有开断非对称短路电流的能力，还应具备关合额定电流的能力以及开断失步电流的能力。

■ 固有恢复电压的要求

瞬态恢复电压上升率取决于发电机和升压变压器的容量等级。等级越高，瞬态恢复电压上升越快。



2.2 隔离开关的选择

1、隔离开关的作用

- 隔离电压
- 倒闸操作
- 分、合小电流：隔离开关具有分、合小电感电流和电容电流的能力
 - 分、合避雷器、电压互感器和空载母线；
 - 分、合励磁电流不超过2A的空载变压器；
 - 关合电容电流不超过5A的空载线路。



第五章 导体和电气设备的原理与选择



第一节 电气设备选择的一般条件

第二节 高压断路器和隔离开关的选择

第三节 互感器的原理及选择

第四节 限流电抗器、熔断器、导体选择*

3.1 互感器的作用与类型

1、互感器的作用

- 将一次侧的高电压、大电流转变成二次侧标准的低电压（100V）、小电流（5A），使测量仪表标准化、小型化；

2、互感器的类型

■ 电流互感器

- 电磁式电流互感器

■ 电压互感器

- 电磁式电压互感器
- 电容式电压互感器

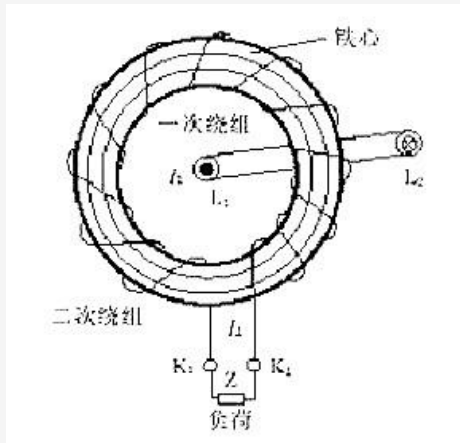
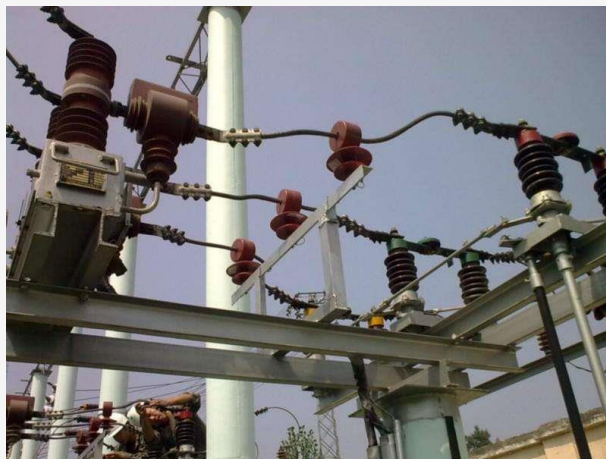


3.2 电磁式电流互感器

1、电磁式电流互感器的工作原理

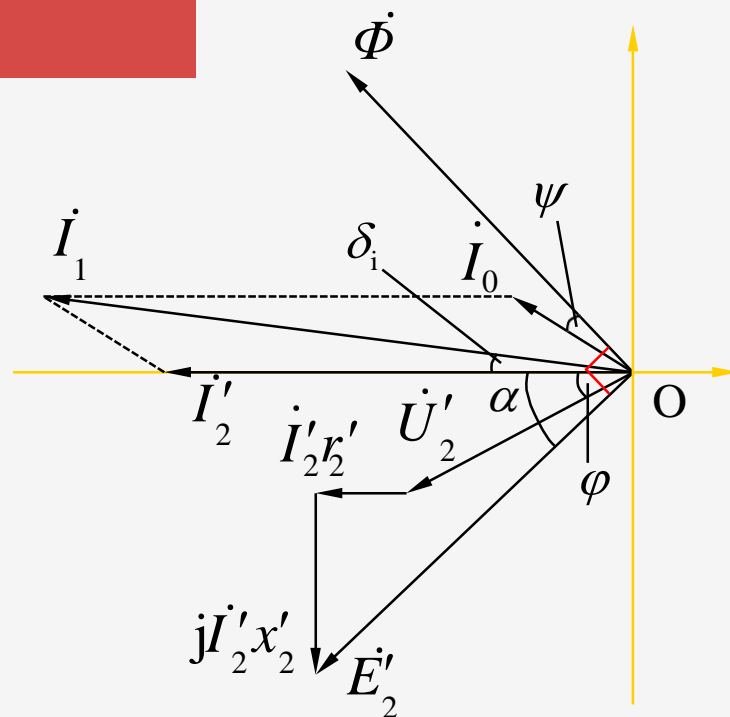
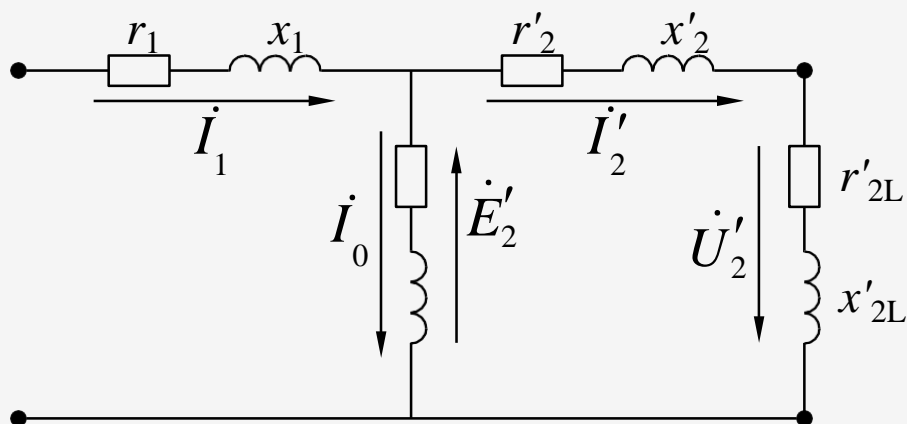
- 电磁式电流互感器的工作原理和变压器相似
- 电磁式电流互感器的特点
 - 一次绕组串联在电路中且匝数很少，而二次绕组匝数多
 - 二次绕组所接负载串联且阻抗很小，类似于二次侧短路状态
- 电流互感器额定变比

$$K_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} \approx \frac{N_2}{N_1}$$



3.2 电磁式电流互感器

2、误差及影响因素



- 由于电流互感器本身存在励磁损耗, 使一次电流 I_1 与 I'_2 在数值和相位上都有差异, 即为误差。

$$\text{幅值误差: } f_i = \frac{K_i I_2 - I_1}{I_1} \times 100\%$$

$$\text{相位误差: } \delta_i = I_1 \text{ 与 } I'_2 \text{ 的夹角}$$

3.2 电磁式电流互感器

2、误差及影响因素

$$f_i = \frac{K_i I_2 - I_1}{I_1} \times 100(\%)$$

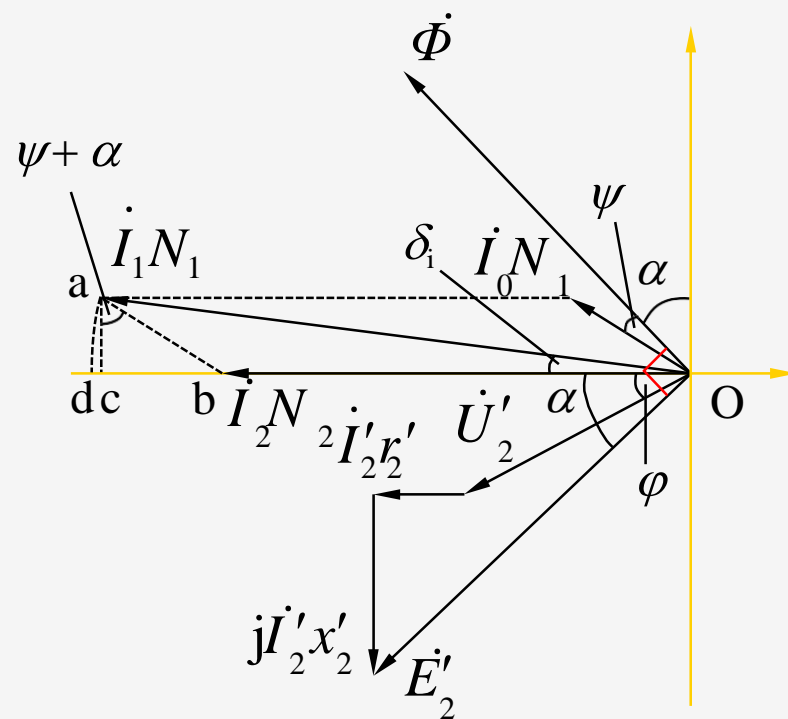
$$= \frac{I_2 N_2 - I_1 N_1}{I_1 N_1} \times 100(\%)$$

$$\dot{I}_2 N_2 - \dot{I}_1 N_1 = \text{Ob} - \text{Oa} = \text{Ob} - \text{Od} \approx -bc$$

$$= -I_0 N_1 \sin(\psi + \alpha)$$

$$f_i = -\frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \sin(\psi + \alpha) \times 100(\%)$$

$$\delta_i \approx \sin \delta_i = \frac{ac}{\text{Oa}} = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \cos(\psi + \alpha) \times 3440(')$$



3.2 电磁式电流互感器

2、误差及影响因素

磁动势方程 $I_0 N_1 = L_{av} B / \mu$

电磁感应定律 $E_2 = 4.44 B S f N_2$

二次回路方程 $E_2 = I_2 (Z_2 + Z_{2L})$

磁动势平衡方程 $I_1 N_1 \approx I_2 N_2 = \frac{4.44 B S f}{Z_2 + Z_{2L}} N_2$

$$f_i \approx -\frac{(Z_2 + Z_{2L}) L_{av}}{222 N_2^2 S \mu} \sin(\psi + \alpha) \times 100(\%)$$

$$\delta_i \approx -\frac{(Z_2 + Z_{2L}) L_{av}}{222 N_2^2 S \mu} \cos(\psi + \alpha) \times 3440(')$$

$$f_i = -\frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \sin(\psi + \alpha) \times 100(\%)$$

$$\delta_i \approx \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \cos(\psi + \alpha) \times 3440(')$$



3.2 电磁式电流互感器

2、误差及影响因素

$$f_i \approx -\frac{(Z_2 + Z_{2L})L_{av}}{222N_2^2 S \mu} \sin(\psi + \alpha) \times 100(\%)$$

$$\delta_i \approx -\frac{(Z_2 + Z_{2L})L_{av}}{222N_2^2 S \mu} \cos(\psi + \alpha) \times 3440(')$$

影响误差的因素：

- ① 二次负载大小 Z_{2L}
- ② 二次负载的性质 α
- ③ 互感器自身结构与铁芯参数 N_2 、 S 、 μ



3.2 电磁式电流互感器

2、误差及影响因素

$$f_i \approx -\frac{(Z_2 + Z_{2L})L_{av}}{222N_2^2 S \mu} \sin(\psi + \alpha) \times 100(\%)$$

$$\delta_i \approx -\frac{(Z_2 + Z_{2L})L_{av}}{222N_2^2 S \mu} \cos(\psi + \alpha) \times 3440(^{\circ})$$

减小误差的措施：

- ① f_i 、 δ_i 与 μ 成反比, 应选用高导磁材料;
- ② f_i 、 δ_i 与 L_{av} 成正比、与 S 成反比, 应减小铁芯磁路长度, 增大铁芯面积;
- ③ f_i 、 δ_i 与 N_2^2 成反比, 应增大 N_2 , 但需保持 K_i 一定;
- ④ 一次电流为额定电流时 μ 接近最大值, 此时误差较小。

3.2 电磁式电流互感器

3、电流互感器二次侧严禁开路

当二次侧开路时, $Z_{2L} = \infty \rightarrow I_2 = 0$

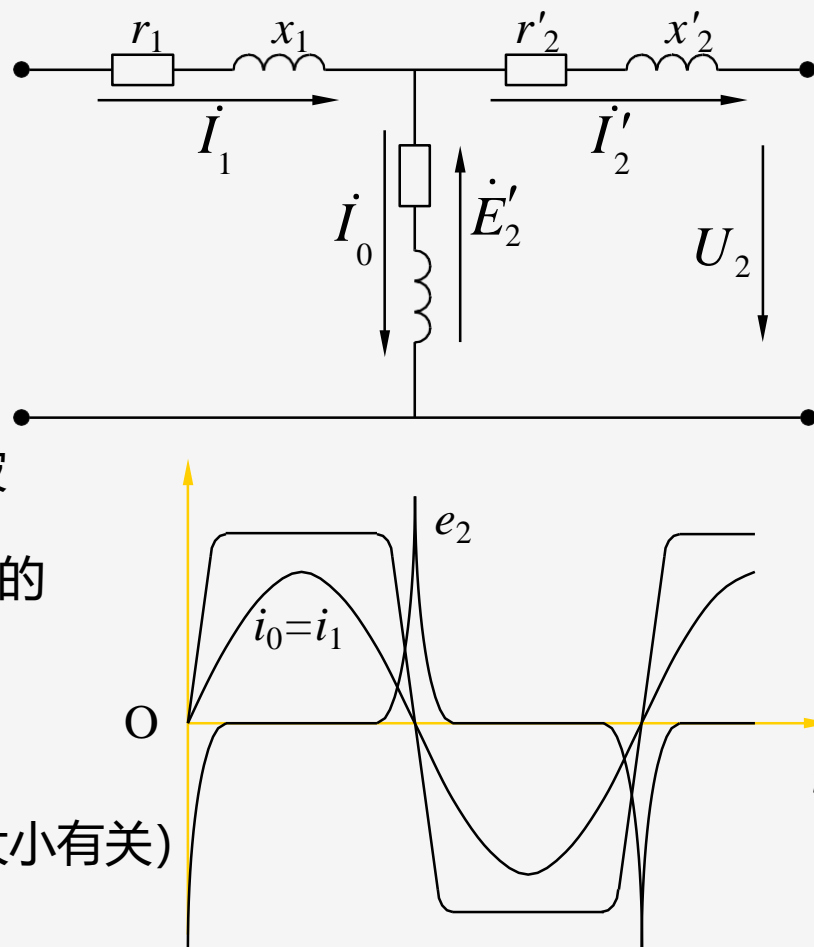
励磁电动势将由 $I_0 N_1$ 骤增为 $I_1 N_1$

→ 铁心中的磁通波形严重饱和而变成平顶波

→ 二次绕组将在磁通过零时, 感应产生很高的尖顶波电势

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

其数值可达数千伏甚至数十千伏 (与 k_i 及 I_1 大小有关)



3.2 电磁式电流互感器

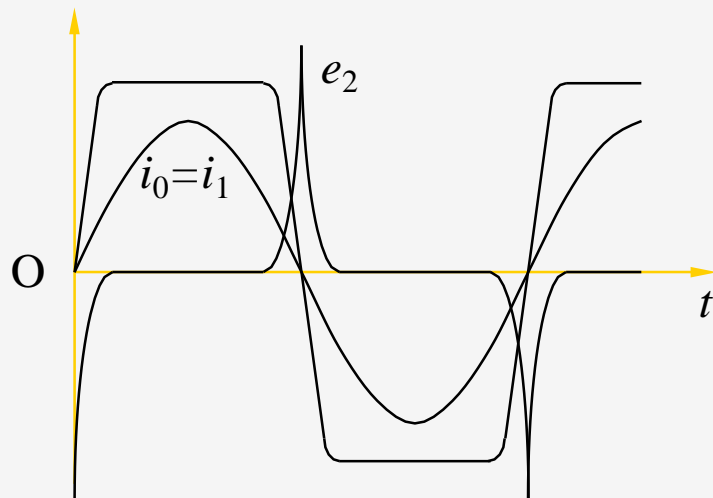
3、电流互感器二次侧严禁开路

主要危害：

- 危及工作人员的安全和仪表、继电器的绝缘
- 磁感应强度剧增，引起铁心和绕组过热
- 铁心中产生剩磁，导致互感器特性变坏

解决办法：

- 可以在互感器二次侧设置接地点，钳制电位为0



3.2 电磁式电流互感器

4、准确度等级

➤ 测量用电流互感器的准确级：

根据测量时误差的大小而划分的，是指在规定的二次负载范围内，一次电流为额定值时的最大误差。

准确级	一次电流为额定电流的百分数(%)	误差限值		二次负荷变化范围
		电流误差(%)	相位差(′)	
0.2	10	± 0.5	± 20	$(0.25 \sim 1)S_{2N}$
	20	± 0.35	± 15	
	100~120	± 0.2	± 10	
0.5	10	± 1	± 60	
	20	± 0.75	± 45	
	100~120	± 0.5	± 30	
1	10	± 0.2	± 120	$(0.5 \sim 1)S_{2N}$
	20	± 1.5	± 90	
	100~120	± 1	± 60	
3	50~120	± 3	不规定	

3.2 电磁式电流互感器

4、准确度等级

➤ 保护用电流互感器的准确级：

■ 稳态保护用(P)：常用的有5P15、10P20、5P40等。

准确级	电流误差(%)	相位差(′)	复合误差(%)
	在额定一次电流下		在额定准确限值一次电流下
5P	± 1.0	± 60	5.0
10P	± 3.0	不规定	10.0

■ 暂态保护用(TP)：分为TPX、TPY、TPZ三个级别

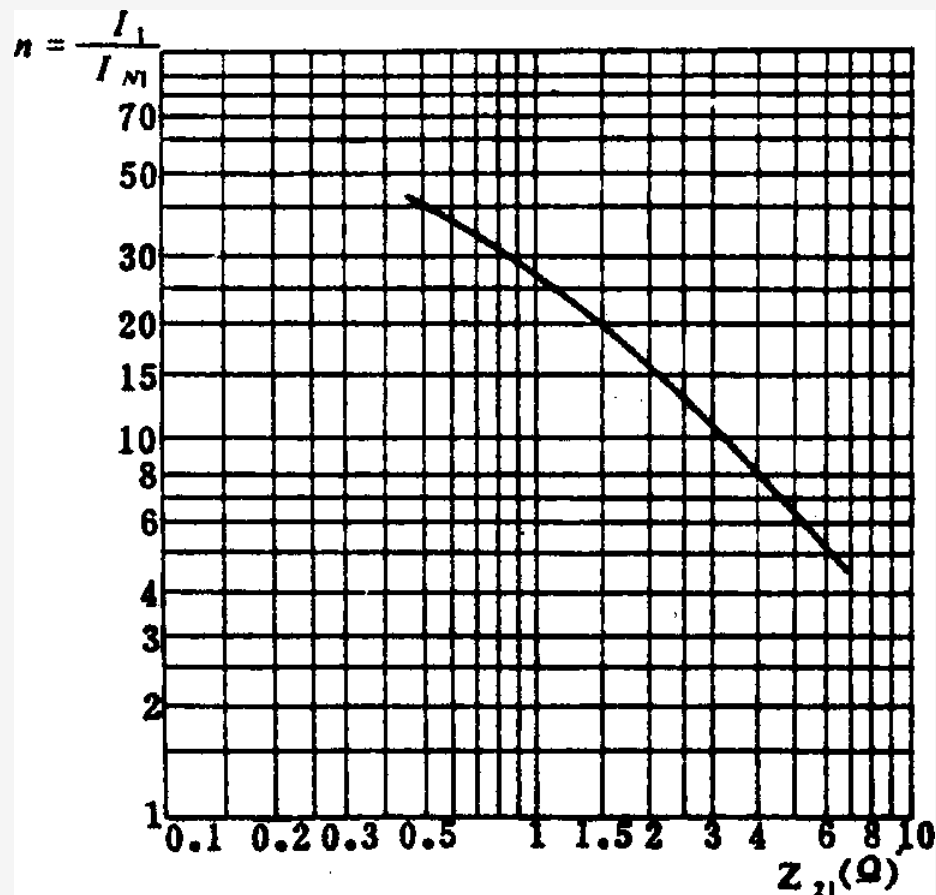


3.2 电磁式电流互感器

4、准确度等级

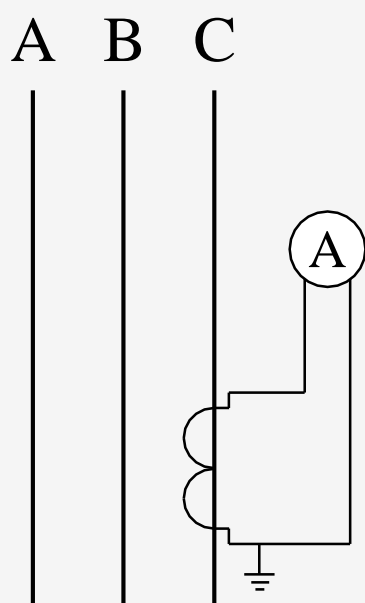
➤ 10%误差曲线

- 在保证电流误差不超过10%的条件下，一次电流的倍数 n ($n = I_1/I_{N1}$) 与允许最大二次负载阻抗 Z_{2L} 的关系曲线

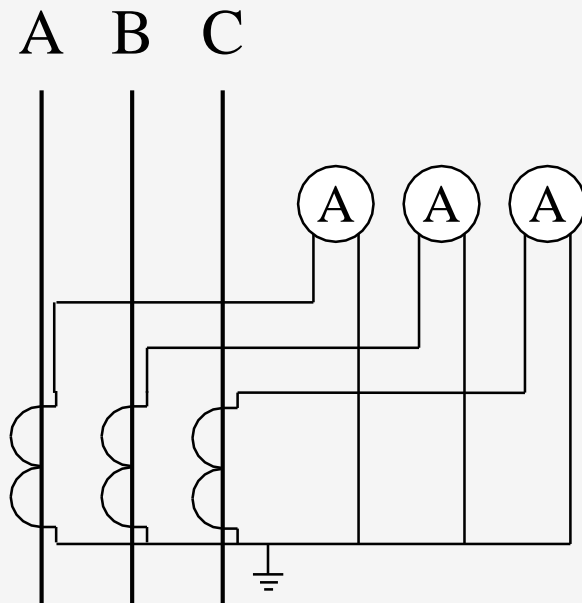


3.2 电磁式电流互感器

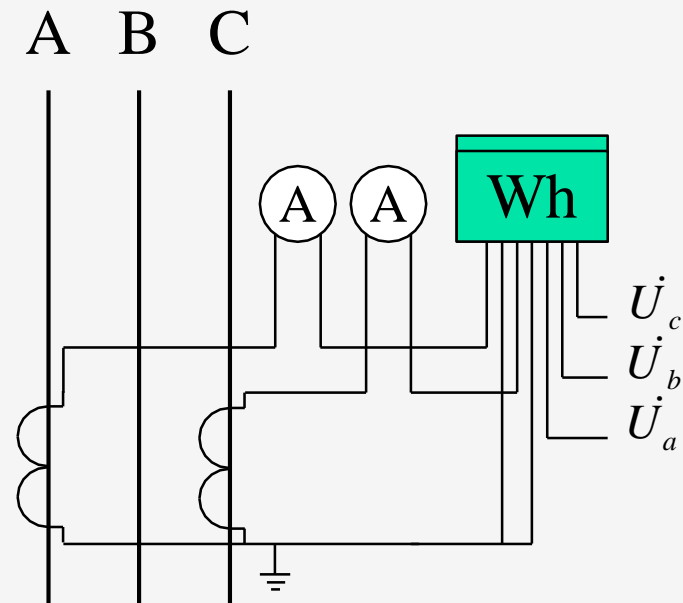
5、接线形式



单相接线



星形接线



不完全星形接线

3.3 电磁式电压互感器

1、电压互感器分类

- 电磁式电压互感器
- 电容式电压互感器

2、电磁式电压互感器

- 电磁式电流互感器的工作原理和变压器相似

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} \qquad U_2 = \frac{U_1}{N_1/N_2} = \frac{U_1}{K_u}$$

- 电磁式电流互感器的特点

- 一次绕组并联在电路中且匝数很多，而二次绕组匝数少
- 二次绕组所接负载并联且阻抗很大，类似于二次侧开路或空载



3.3 电磁式电压互感器

3、误差与影响因素

- 由于电压互感器存在励磁电流和内阻抗，使得测量结果的大小和相位都有误差。

电流误差：
$$f_u = \frac{K_u U_2 - U_1}{U_1} \times 100(\%)$$

相位误差： $\delta_u = \dot{U}_1 \text{ 与 } \dot{U}_2 \text{ 的夹角}$

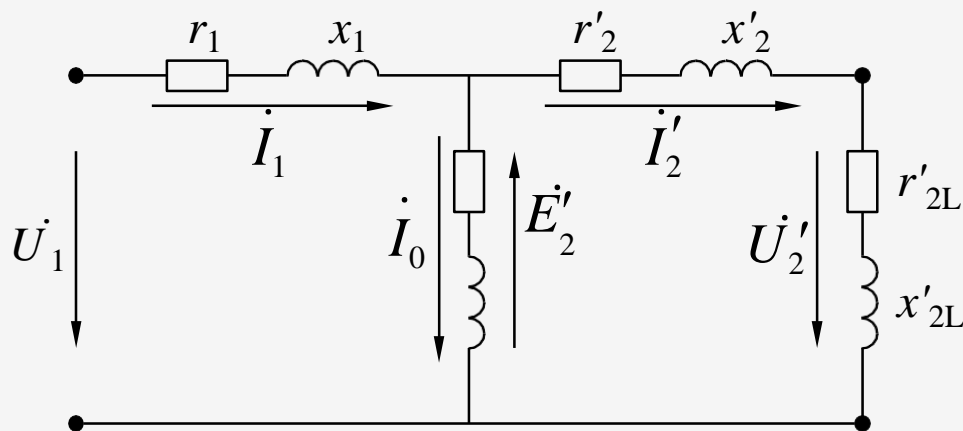


Part 3

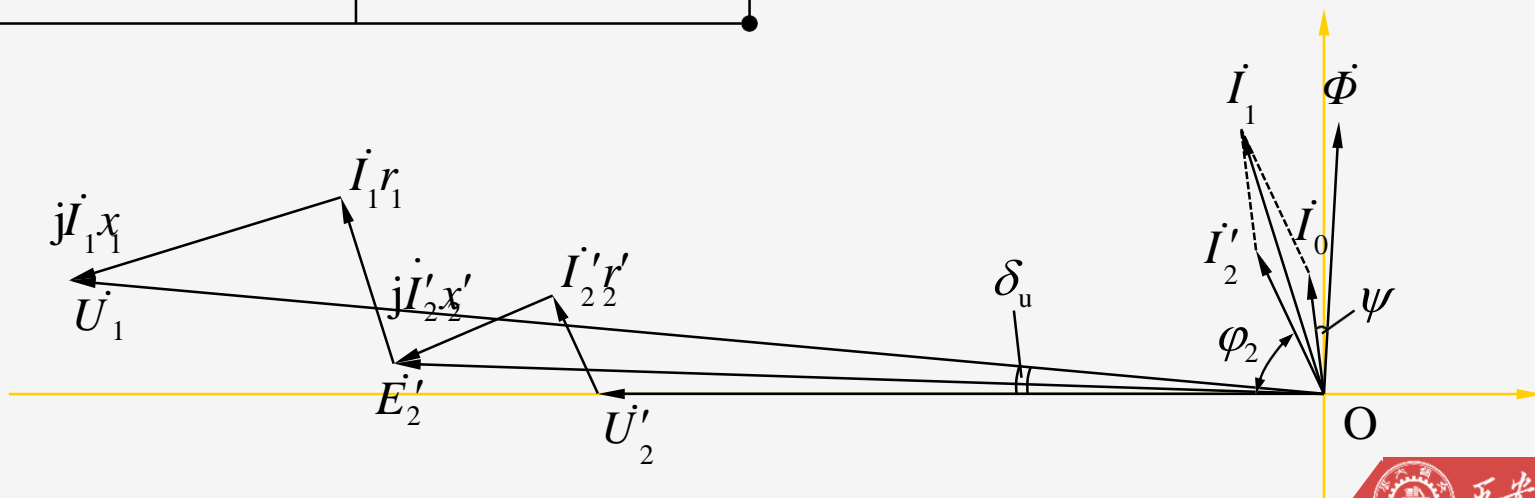
互感器的原理与选择

3.3 电磁式电压互感器

3、误差与影响因素



$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$



Part 3

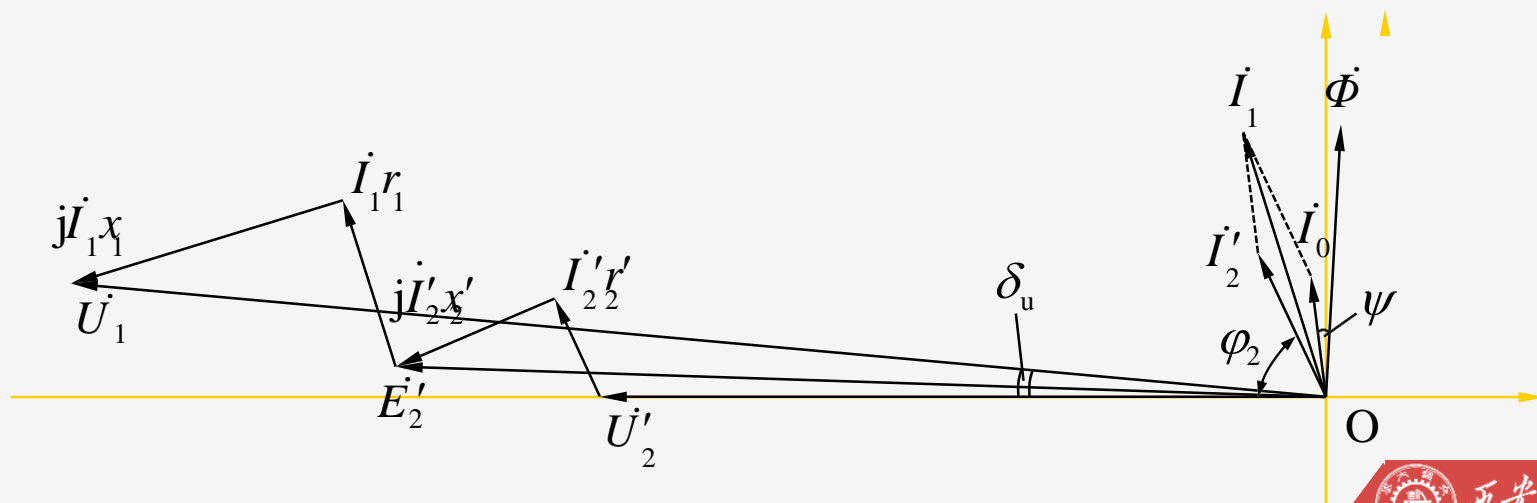
互感器的原理与选择

3.3 电磁式电压互感器

3、误差与影响因素

$$f_u \approx - \left[\frac{I_0 r_1 \sin \psi + I_0 x_1 \cos \psi}{U_1} + \frac{I'_2 (r_1 + r'_2) \cos \varphi_2 + I'_2 (x_1 + x'_2) \sin \varphi_2}{U_1} \right] \times 100(\%)$$

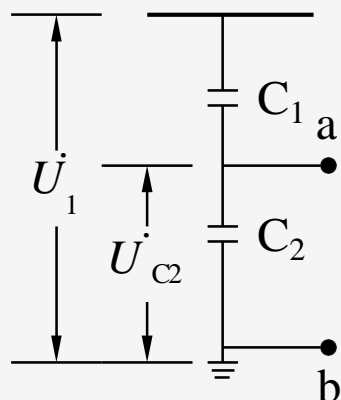
$$\delta_u \approx \left[\frac{I_0 r_1 \cos \psi - I_0 x_1 \sin \psi}{U_1} + \frac{I'_2 (r_1 + r'_2) \sin \varphi_2 - I'_2 (x_1 + x'_2) \cos \varphi_2}{U_1} \right] \times 3440(^{\circ})$$



3.4 电容式电压互感器

1、工作原理

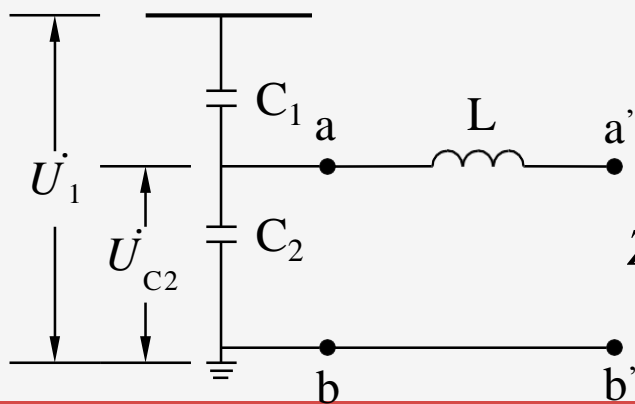
■ 本质上是一个电容分压器



当a、b间开路时，按反比分压

$$U_{C2} = \frac{U_1 C_1}{C_1 + C_2} = K U_1 \quad K = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \text{ —— 分压比}$$

当a、b间接上负荷时，由于 C_1 、 C_2 有内阻压降，使 U_{C2} 小于电容分压值，而且负荷越大，误差越大。



为减少负荷对测量的影响，在回路中串联补偿电感 L

$$Z'_i = j\omega L - j \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)}$$

$$\text{当 } \omega L = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \text{ 时,}$$

输出电压 U_{C2} 与负荷无关



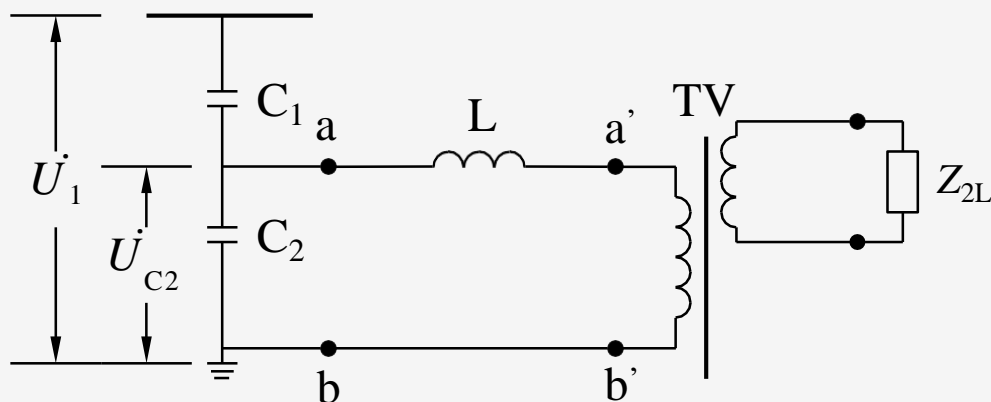
3.4 电容式电压互感器

1、工作原理

■ 本质上是一个电容分压器

实际上，由于电容器损耗、电抗器电阻，使内阻不可能为零，因此负荷变化时，还会有误差产生。

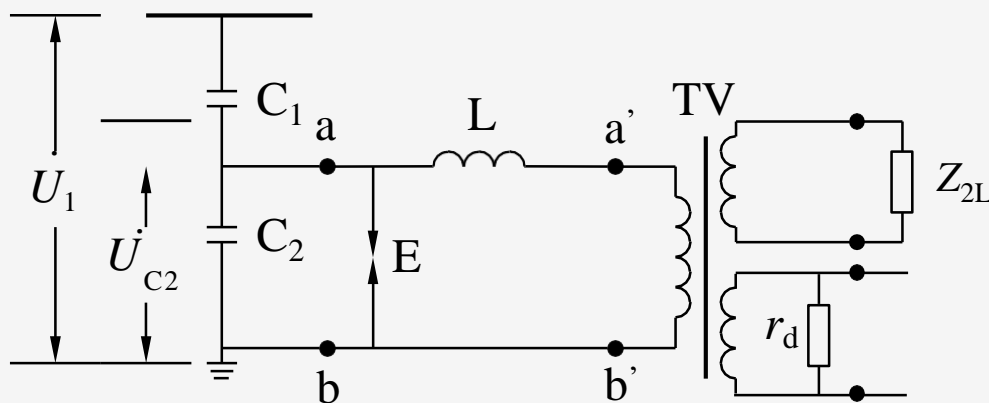
为了进一步减小负荷电流的影响，将测量仪表(Z_{2L})经中间变压器TV升压后与分压器连接。



3.4 电容式电压互感器

2、过电压

■ 二次侧短路引起的过电流和过电压



二次侧短路 $\rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow$
 $\rightarrow I_1 \omega L \uparrow \rightarrow U_{C2} \uparrow$
 $\rightarrow C_2$ 过电压, 可能击穿
 所以应加放电间隙 E

■ 铁磁谐振过电压

由于电容式电压互感器是由电容和非线性电抗所构成, 当受到二次侧短路、断开等冲击瞬变作用时, 由于非线性电抗的饱和, 可能激发产生次谐波铁磁谐振。

抑制方法是装设阻尼器 r_d (谐振时自动投入)。