

# 国家电网·必考必会

## ——电气类



我加入了这个星球，邀你一起学习



### 成都央国企指南

合伙人：浣熊 say

**150+**

成员数量

**120+**

内容数量

**77**

运营天数

当我还是一名应届生的时候除了学校就业网站，公开渠道很难找到央国企的福利待遇、工作情况、招聘面试的信息，很多时候只能私下托关系去找人打听这些信息。与之相...

**现价: ¥69**

微信扫码加入星球



知识星球

# 电气类

## 目录

一、电 路.....	1
二、电磁场.....	31
三、电 机.....	41
四、电力系统分析.....	51
五、电力系统继电保护.....	93
六、高电压技术.....	124
七、电气设备与主系统.....	144

# 一、电 路

## 核心知识点 1 电压与电流的参考方向

### (一) 实际方向

#### 1. 电流的实际方向

规定正电荷的运动方向为电流的实际方向。

#### 2. 电压的实际方向

假设电压方向，用正极性 (+) 表示高电位，负极性 (—) 表示低电位，正极指向负极的方向就是电压的参考方向。

### (二) 参考方向

#### 1. 电流的参考方向

参考方向是分析电路前任意指定的，所选的参考方向并不一定就是电流的实际方向。



(a)  $i > 0$



(b)  $i < 0$

图 (a) 中电流为正值，即  $i > 0$ ，电流的实际方向与参考方向一致。

图 (b) 中电流为负值，即  $i < 0$ ，电流的实际方向与参考方向相反。

#### 2. 电压的参考方向

假设电压方向，用正极性 (+) 表示高电位，负极性 (—) 表示低电位，正极指向负极的方向就是电压的参考方向。

#### 3. 关联参考方向

电流参考方向与电压参考方向相同，称为关联参考方向；若相反，称为非关联参考方向。

### (二) 电功率

①, 取关联参考方向

$$p=ui$$

$p>0$ : 实际吸收正功率, 相当于负载元件。

$p<0$ : 实际吸收负功率, 相当于电源元件。

②, 取非关联参考方向

$$p=-ui$$

$p>0$ : 实际吸收正功率, 相当于负载元件。

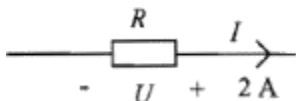
$p<0$ : 实际吸收负功率, 相当于电源元件。

### 【例题实战】

1. 下面两图的参考方向是否关联?



2. 在图所示电阻元件R 消耗电功率10W, 则电压U 为 ( )。

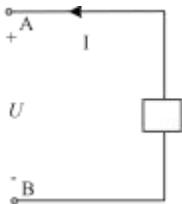


A. -5V

B. 5V

C. 20V

3. 某电路中一支路如图所示, 电源U 和电流I 的方向已标注在图中, 且 $I = -1\text{A}$ , 则图中对于该支路描述正确的是( )



- A.  $U$ 、 $I$  为关联方向，电流  $I$  的实际方向是自 A 流向 B  
 B.  $U$ 、 $I$  为关联方向，电流  $I$  的实际方向是自 B 流向 A  
 C.  $U$ 、 $I$  为非关联方向，电流  $I$  的实际方向是自 A 流向 B  
 D.  $U$ 、 $I$  为非关联方向，电流  $I$  的实际方向是自 B 流向 A

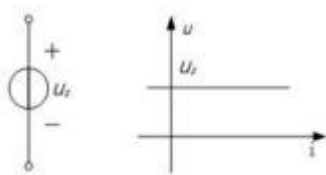
### 【答案解析】

1. 【答案】左图关联，右图不关联。
2. 【答案】B。
3. 【答案】C。

## 核心知识点 2 电源元件

### (一) 理想电压源

1. 定义：无论电流为何值，其端电压保持常量或按给定的时间函数变化。



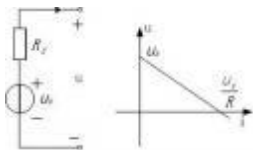
### 理想电压源及其伏安特性

2. 特性：

- ① 端电压固定不变或是时间  $t$  的函数  $u_s(t)$ ，与外电路无关。
- ② 理想电压源的电流与外接电路有关，由其电压和外接电路共同确定。
- ③ 理想电压源的内阻为 0。
- ④ 理想电压源可以开路但不可短路。

### (二) 实际电压源

1.定义：实际电压源是理想电压源与电阻的串联。



实际电压源及其伏安特性

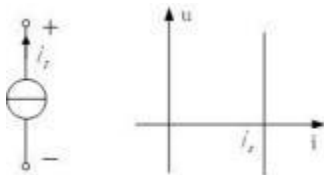
2.伏安关系： $u = u_s - iR_s$

3.特性：

- ①输出电压随着电流的增大而减小。
- ②电源的内阻越小，电源外特性越好。

### (三) 理想电流源

1.定义：电压无论为何值，其电流保持常量或给定时间函数变化。



理想电流源及其伏安特性曲线

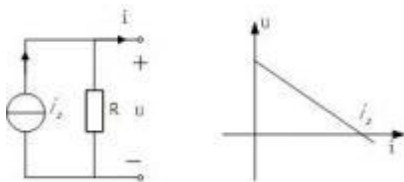
2.特性：

- ①理想电流源的电流由其特性确定，与其在电路中的位置和外电路无关。
- ②理想电流源的电压与外接电路有关，由其电流和外接电路共同确定。
- ③理想电流源的内电阻为 $\infty$ 。

④理想电流源可以短路但不可开路。

#### (四) 实际电流源

1.定义：实际电流源是理想电流源与电阻的并联。



实际电流源及其伏安特性曲线

2.特性：

- ①输出电流随着电压的增大而减小。
- ②电源的内阻越大，电源外特性越好。

#### 【例题实战】

1.若想让电路中的理想电压源和理想电流源不工作，应该怎么让它们置零？电压源（ ），电流源（ ）。

- A.开路，短路
- B.短路，开路
- C.短路，短路
- D.开路，开路

2.理想电流源外接电阻越大，则它的端电压（ ）。

- A.越高
- B.越低
- C.不能确定
- D.不变

3.理想电流源的端电压为零（ ）

- A.正确
- B.错误

#### 【答案解析】

1.【答案】B。

2.【答案】A。

3.【答案】B。

## 核心知识点 3 负载元件

### (一) 电阻 R

定义：表示导体材料对电流阻碍作用的大小。电导  $G = \frac{1}{R}$ ，单位：S，西门子。

1.决定式：  $R = \frac{\rho L}{S}$ ，单位： $\Omega$ ，欧姆。

$\rho$ ：导体的电阻率；L:长度；S:横截面积。

2.线性表达式（伏安特性）： $u=iR$ 。



线性电阻元件及其伏安特性曲线

3.伏安关系（VCR）：关联参考方向下： $u=iR$ 。

4.功率、能量：关联参考方向下： $p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} > 0$ ， $W = \int_{t_1}^{t_2} p dt > 0$

5.性质：耗能元件。

### (二) 电感 L

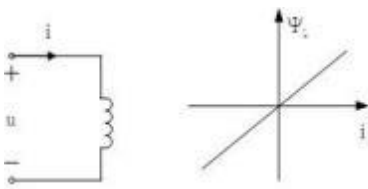
定义：表征电路元件储存磁场能量的理想元件。



1. 决定式:  $L = \frac{\mu AN^2}{l}$  单位: H, 亨利, 常用 mH.  $\mu$ : 磁导率; A: 线圈横截面积;

N: 匝数;  $l$ : 线圈长度.

2. 线性表达式 (韦安特性):  $L = \frac{\psi}{i}$ .



### 线性电感元件及其韦安特性

3. 伏安关系 (VCR): 关联参考方向下:  $u = L \frac{di}{dt}$

4. 能量:  $W = \int_{-\infty}^t p dt = \frac{1}{2} L [i^2(t) - i^2(-\infty)] \xrightarrow{i(-\infty)=0} W = \frac{1}{2} L i^2(t)$

5. 性质: 储能元件, 非耗能元件。通直流阻交流, 通低频阻高频。动态元件 (只有随时间变化的电流才能产生电压)

6. 连接: 串联  $L = L_1 + L_2$ , 并联  $L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$

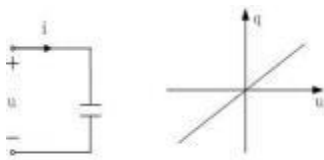
### (三) 电容 C

定义: 表征电路元件储存电荷特性的理想元件。

1. 决定式:  $C = \frac{\epsilon S}{d}$ , 单位: F, 法拉, 常用的单位  $\mu F$ ,  $pF$ .  $\epsilon$ : 介电常数; S:

极板正对面积;  $d$ : 极板距离

2. 线性表达式 (库伏特性):  $C = \frac{q}{u}$



### 线性电容元件及其库伏特性

3. 伏安关系 (VCR): 关联参考方向下:  $i = C \frac{du}{dt}$

$$4. \text{能量: } W = \int_{-\infty}^t p dt = \frac{1}{2} C u^2(t) - u^2(-\infty) \xrightarrow{u(-\infty)=0} W = \frac{1}{2} C u^2(t)$$

5. 性质: 储能元件, 非耗能元件。通交流阻直流, 通高频阻低频。动态元件 (只有随时间变化的电压才能产生电流)

6. 连接: 串联  $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ , 并联  $C = C_1 + C_2$

### 【例题实战】

- (多选) 有关电路中电流流向的说法正确的有 ( ) 。
  - 在电源内部从电源的负极流向正极
  - 从负载的负极流向正极
  - 在外电路中从电源的正极流向负极
  - 在外电路中从电源的负极流向正极
- 电容在直流电路中相当于开路, 电感在直流电路中相当于短路。 ( )
  - 正确
  - 错误

### 【答案解析】

1. 【答案】 AC。

2. 【答案】 A。

## 核心知识点 4 基尔霍夫定律

集总电路由集总元件相互连接而成。基尔霍夫定律是集总电路的基本定律。每一种集总元件被假设集中由一种电磁现象所表征，例如，电阻元件集中表征了某一个实际部件或某一段实际电路中的能量损耗。

支路：组成电路的每一个二端元件称为一条支路，之后为了需要，可以把元件的串联组合作为一条支路处理。

节点：三条或三条以上支路的连接点。

回路：由支路所构成的闭合路径。

网孔：平面电路中，限定的区域内不再有支路的回路。

### （一）基尔霍夫电流定律（第一定律）

1. 定义：在集总电路中，任何时刻，对任一节点，所有流出节点的支路电流的代数和恒等于零。也可以理解为在任何时刻，流出任一节点的支路电流等于流入该节点的支路电流。

KCL 通常用于节点，但是对于包围几个节点的闭合面也是适用的。

2. 方程式：  $\sum i = 0$  或  $\sum i_{in} = \sum i_{out}$

### （二）基尔霍夫电压定律（第二定律）

1. 定义：在集总电路中，任何时刻，沿任一回路，所有支路电压的代数和恒等于零。也可以理解为在任何时刻，元件上的电压的代数和等于电源电压的代数和。

2.方程式:  $\sum u = 0$  或  $\sum E = \sum U$

### (三) KCL 和 KVL 特性

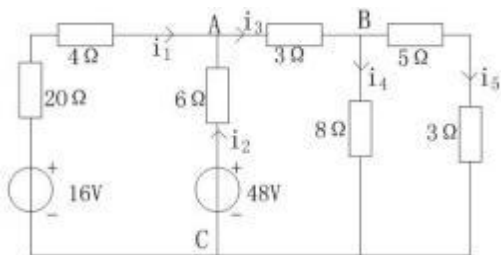
- 1.KCL 反应了电流的连续性, 是电荷守恒的体现; KVL 是能量守恒的体现。
- 2.KCL 是对支路电流的线性约束关系; KVL 是对支路电压的线性约束关系。
- 3.KCL、KVL 与元件的相互连接有关, 但与元件的性质无关。
- 4.KCL、KVL 适用于集总电路。

### (四) KCL 和 KVL 的独立方程

- 1.KCL 独立方程数:  
对于  $n$  个节点的电路, 可以得出  $(n-1)$  个独立的 KCL 方程。
- 2.KVL 独立方程数:  
对于  $n$  个节点,  $b$  条支路的电路, 可以得出  $(b-n+1)$  个独立的 KVL 方程。

### 【例题实战】

- 1.应用基尔霍夫定律列写方程时, 可以不用参照参考方向。( )  
A.正确 B.错误
- 2.基尔霍夫定律适用于( )。  
A.分布电路 B.集总电路  
C.分离元件电路 D.集成电路
- 3.求下图电路各节点的 KCL 和各网孔的 KVL 方程。



- 4.下列说法正确的是( )。  
A.任何线性集中参数电路的电压电流都要受 KCL、KVL 和 VCR 方程的约束。

B. 同一电路中，当选择的参考点不同时，对任一节点的电位和任两点间的电压均有影响。

C. 元件上电流与电压取关联参考方向，已知  $I > 0$ ,  $U < 0$ ，则该元件是吸收功率的。

D. 一个实际电压源外接电阻越小，其端电压也越小。

### 【答案解析】

1. 【答案】B。解析：基尔霍夫定律中代数数和表明与参考方向有关。

2. 【答案】B。

3. 【答案】KCL：节点A:  $i_1 + i_2 = i_3$ ；节点B:  $i_3 = i_4 + i_5$ ；

左网孔:  $20i_1 + 4i_1 - 6i_2 + 48 - 16 = 0$

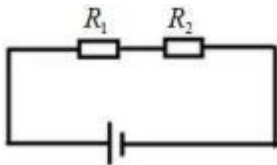
KVL：中网孔:  $3i_3 + 8i_1 - 48 + 6i_2 = 0$

右网孔:  $5i_5 + 3i_5 - 8i_4 = 0$

4. 【答案】AD。解析：B 参考点不同时，任一节点的电位会发生变化，但任两点之间的电压不会发生变化。C 取关联参考方向时， $P=UI<0$ ，则发出功率。D 实际电源含内阻，外电阻越小，内电阻所分电压越大。

## 核心知识点 5 电阻的串并联

### (一) 电阻的串联



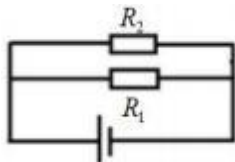
1. 特征：在一条支路上，流过同一电流。

2. 等效电阻:  $R_{eq} = \sum_{k=1}^n R_k$ 。若  $R_k = R$  ( $k=1$  喻  $n$ )，则  $R_{eq} = nR$ 。

3. 电压分配:  $U = IR$ ,  $R$  个喻  $U$  个。

4.功率分配:  $P = I^2 R$ ,  $R$  个喻  $P$  个。

## (二) 电阻的并联



1.特征: 在不同的支路上, 承受同一电压。

2.等效电导:  $G_{eq} = \sum G_k$

3.等效电阻:  $\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$ 。若  $R_k = R$  ( $k=1$  喻  $n$ ) , 则  $R_{eq} = \frac{1}{n} R$ 。

4.若两个阻值不相同的电阻并联, 则  $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

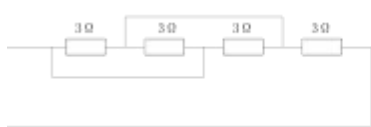
5.电流分配:  $I = \frac{U}{R}$ ,  $R$  个喻  $I$  专。

6.功率分配:  $P = \frac{U^2}{R}$ ,  $R$  个喻  $P$  专。

## (三) 电阻的混联

定义: 当电阻电路中既有串联又有并联时, 称为电阻的串、并联, 或简称混联。

关键: 理清串、并联关系。运用等电位法。

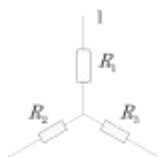


(a) 整理前

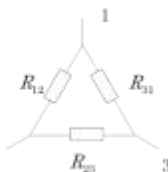


(b) 整理后

#### (四) 电阻的 Y- $\Delta$ 变换



(a) Y 形联结



(b)  $\Delta$ 形联结

##### 1. $Y \rightarrow \Delta$

由 Y 联结的电阻等效变换为  $\Delta$  联结的电阻关系式为:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2}$$

Y 形联结的电阻变换为  $\Delta$  时, 两点直连电阻=相连电阻之和+ $\frac{\text{相连电阻之积}}{\text{对电阻}}$

##### 2. $\Delta \rightarrow Y$

由  $\Delta$  联结的电阻等效变换为 Y 联结的电阻关系式为:

$$R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_3}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

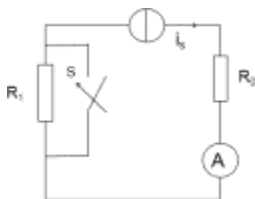
$$R_3 = \frac{R_2 R_1}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

△形联结的电阻变换为Y 时，某点直连电阻=  $\frac{\text{相连电阻之积}}{\text{各电阻之和}}$

若Y 形联结与△形联结中的所有电阻均相等，则  $R_\Delta = 3R_Y$ 。

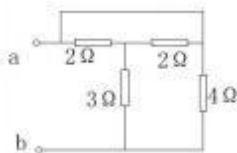
### 【例题实战】

1. 如图所示的电路中，当开关S 闭合后，电流表读数将（ ）。



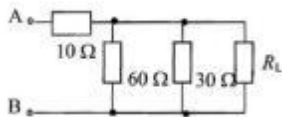
- A. 减少      B. 增加      C. 不变      D. 不定

2. 图示电路中，等效电阻  $R_{ab}$  为（ ）。



- A.  $1\ \Omega$       B.  $5\ \Omega$       C.  $2\ \Omega$       D.  $3\ \Omega$

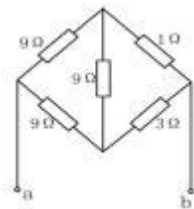
3. 下图所示电路中，A、B 两点间的等效电阻与电路中的  $R_L$  相等，则  $R_L$  为（ ）。



- A.  $40\ \Omega$       B.  $30\ \Omega$       C.  $20\ \Omega$       D.  $50\ \Omega$

4. 图示电路中，等效电阻  $R_{ab}$  是多少？





### 【答案解析】

1. 【答案】C。
2. 【答案】C。
3. 【答案】C。
4. 【答案】 $5.4\Omega$ 。

## 核心知识点 6 电路定理

### (一) 叠加定理

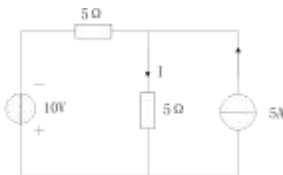
1. 定义：在线性电路中，某处电压或电流都是电路中各个独立电源单独作用时，在该处分别产生的电压或电流的叠加。

2. 步骤：

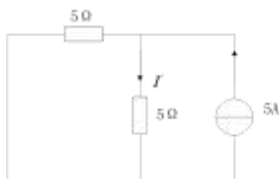
(1) 做每个独立电源单独作用的电路分图。不作用的独立源置零：电压源短路，电流源开路。

(2) 求电路分图中的分量。

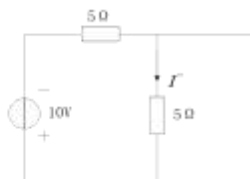
(3) 求代数数和。



(a) 电路原图



(b) 电流源单独作用



(c) 电压源单独作用

$$I = I' + I'' = 2.5 + (-1) = 1.5A$$

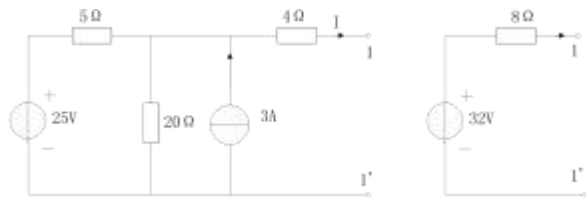
### 3. 注意

- (1) 叠加定理适用于线性电路，不适用于非线性电路。
- (2) 在叠加的各分电路中，不作用的电压源置零，在电压源处用短路代替，不作用的电流源置零，在电流源处用开路代替，电路中的所有电阻都不更动。
- (3) 叠加时各分电路中的电压和电流的参考方向可以取与原电路相同。取代数和时间，应注意各分量前的“+”、“-”号。

## (二) 戴维宁定理

### 1. 定理:

一个含独立电源、线性电阻和受控源的一端口，对外电路来说，可以用一个电压源和电阻的串联组合等效置换，此电压源的激励电压等于一端口的开路电压 $U_{OC}$ ，电阻 $R_{eq}$ 等于一端口内全部独立电源置零后的输入电阻。



(a) 原电路

(b) 戴维宁等效电路

戴维宁等效电阻 $R_{eq}$ 的求法：

1. 若除源后的一端口只含电阻，不含受控源，用电阻的串并联、星三角变换求 $R_{eq}$ 。
2. 分别求出的有源一端口的开路电压 $U_{OC}$ 及短路电流 $I_{SC}$ ，则 $R_{eq} = \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$ 。
3. 若除源后的一端口含有受控源，则用“加压求流法”求得端口的 $R_{eq}$ 。

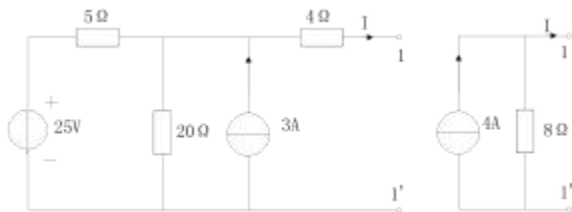
## 2. 特征：

- (1) 戴维宁定理只对外电路等效，对内电路不等效。
- (2) 应用戴维宁定理进行分析和计算时，若待求支路的有源二端网络仍为复杂电路，可再次运用戴维宁定理，直至成为简单电路。
- (3) 戴维宁定理建立在叠加定理基础之上，故只适用于线性的有源二端网络。

## (三) 诺顿定理

### 1. 定理:

一个含独立电源、线性电阻和受控源的一端口，对外电路来说，可以用一个电流源和电阻的并联组合等效置换，此电流源的激励电流等于一端口的短路电流 $I_{SC}$ ，电阻 $R_{eq}$ 等于一端口内全部独立电源置零后的输入电阻。



(a) 原电路

(b) 诺顿等效电路

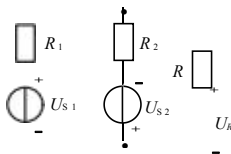
### 2. 特征:

- (1) 诺顿定理只对外电路等效，对内电路不等效。
- (2) 应用诺顿定理进行分析和计算时，如果待求支路的有源二端网络仍为复杂电路，可再次运用诺顿定理，直至成为简单电路。
- (3) 诺顿定理只适用于线性的有源二端网络。
- (4) 戴维宁定理和诺顿定理的适当选取将会简化计算过程，戴维宁定理和诺顿定

理之间相互变换：
$$I_{SC} = \frac{U_{OC}}{R_{eq}}$$

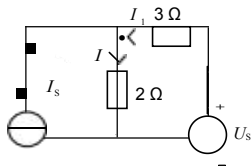
### 【例题实战】

1. 在下图所示电路中，已知：  $U_{S1} = U_{S2} = 3V$ ， $R_1 = R_2$ ，当电压源  $U_{S1}$  单独作用时，电阻  $R$  两端电压  $U_R = 1V$ 。那么，当电压源  $U_{S2}$  单独作用时， $R$  的端电压  $U_R$  又将为 ( )。



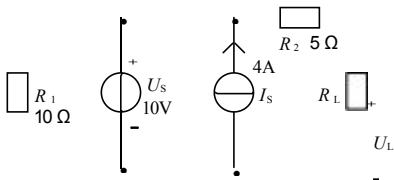
- A. 1V                      B. 0V                      C. -1V                      D. 3V

2. 已知图所示电路中的  $I_S = 5A$ ，当  $U_S$  单独作用时， $I_1 = 3A$ ，那么当  $I_S$ 、 $U_S$  共同作用时， $2\Omega$  电阻中电流  $I$  是 ( )。



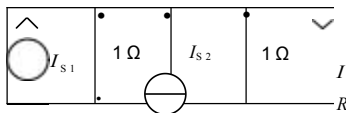
- A. 5A                      B. 6A                      C. 0A                      D. 3A

3. 在下图所示电路中，当电压源  $U_S$  单独作用时，电阻  $R_L$  的端电压  $U_L = 5V$ ，那么当电流源  $I_S$  单独作用时，电阻  $R_L$  的端电压  $U_L$  又将变为 ( )。



- A. 10V                      B. -10V                      C. 0V                      D. 5V

4. 下图所示电路中，已知： $I_{S1}=3A$ ， $I_{S2}=6A$ 。当理想电流源 $I_{S1}$ 单独作用时，流过电阻 $R$ 的电流是 $1A$ ，那么，当理想电流源 $I_{S1}$ 和 $I_{S2}$ 共同作用时，流过电阻 $R$ 的电流 $I$ 值为（ ）。



- A.  $-1A$                       B.  $1A$                       C.  $-2A$                       D.  $2A$

5. 有源二端网络的短路电流为 $8A$ ，等效内阻为 $4\Omega$ ，则开路电压为（ ）。

- A.  $2V$                       B.  $8V$                       C.  $16V$                       D.  $32V$

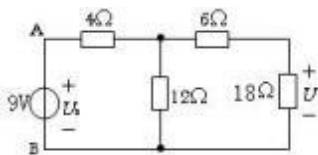
6. 诺顿指出，对外电路的等效电阻可将有源二端口网络内所有独立电源（ ），等效电阻等于此无源二端口网络的输入电阻。

- A. 置零                      B. 短路                      C. 开路                      D. 断路

7. （多选）关于诺顿定理，下列叙述正确的是（ ）

- A. 在诺顿等效电路中的电流源电流是有源性二端网络的短路电流。  
 B. 诺顿定理可将复杂的有源性二端网络等效为一个电流源和电阻的串联。  
 C. 诺顿定理等效电阻是将有源性二端网络内部所有的独立源置零后，从端口看进去的输入电阻。  
 D. 用诺顿等效电路代替原有的有源性二端网络，不影响外电路的求解。

8. 已知电源电压是 $9V$ ，那么 $18\Omega$ 电阻上的电压是（ ） $V$ 。



A.9

B.4.5

C.6

D.8

### 【答案解析】

1. 【答案】C。

2. 【答案】B。

3. 【答案】C。

4. 【答案】A。

5. 【答案】D。解析：根据  $U_{OC} = I_{sc} R_{eq}$ ，开路电压为32V。

6. 【答案】A。

7. 【答案】ACD。解析：诺顿定理可将复杂的有源线性二端网络等效为一个电流源和电阻的并联，故B选项错误。

8. 【答案】B。解析：戴维宁等效电路  $U_{OC} = \frac{27}{4}V$ ，等效电阻  $R_{eq} = 9\Omega$ 。那么

18Ω上的电压为  $\frac{27/4}{9+18} \times 18 = 4.5V$ 。

## 核心知识 7 正弦交流电

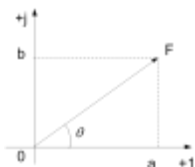
### (一) 复数

相量法是线性电路正弦稳态分析的一种简单易行的方法。在介绍相量法之前，需要了解复数及其运算。

一个复数有多种表示形式：代数形式、三角形式、指数形式和极坐标形式。在进行复数运算的时候，主要使用的是复数的代数形式和极坐标形式。

1. 代数形式： $F = a + jb$

式中  $a$  为复数  $F$  的实部， $b$  为  $F$  的虚部。 $j = \sqrt{-1}$  为虚单位。



2. 极坐标形式： $F = |F| \angle \theta$

式中  $F$  为复数的模（值）， $\theta$  为复数的辐角，可以用弧度或度表示。

3. 复数的加减运算

设  $F_1 = a_1 + jb_1$ ， $F_2 = a_2 + jb_2$

$$F_1 \pm F_2 = (a_1 + jb_1) \pm (a_2 + jb_2) = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2)$$

4. 复数的乘除运算

设  $F_1 = |F_1| \angle \theta_1$ ， $F_2 = |F_2| \angle \theta_2$

相乘： $F_1 F_2 = |F_1| \angle \theta_1 |F_2| \angle \theta_2 = |F_1 F_2| \angle (\theta_1 + \theta_2)$

相除： $\frac{F_1}{F_2} = \frac{|F_1| \angle \theta_1}{|F_2| \angle \theta_2} = \frac{|F_1|}{|F_2|} \angle (\theta_1 - \theta_2)$

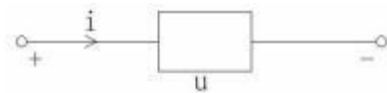
## (二) 正弦量与相量法



电路中按正弦规律变化的电压或电流，统称为正弦量。对正弦量的数学描述，可以采用  $\sin$  函数，也可以用  $\cos$  函数。

下图表示一段电路中有正弦电流  $i$ ，在图示参考方向下，其数学表达式为定义如下：

$$i = I_m \sin(\omega t + Q_i)$$



1. 正弦量的三要素  $I_m$ 、 $\omega$  和  $Q_i$ 。

(1)  $I_m$ ：正弦量的振幅，它是正弦量在整个震荡过程中达到的最大值。

(2)  $\omega$ ：正弦量的角频率， $\omega = \frac{2\pi}{T}$  或  $\omega = 2\pi f$  ( $f = \frac{1}{T}$ )

(3)  $Q_i$ ：正弦量的初相角 (位)，简称初相，用弧度或角度表示。

2. 性质：正弦量乘以常数，正弦量的微分、积分，同频正弦量的代数和等运算，

其结果仍为一个同频率的正弦量。

3. 有效值与振幅的关系： $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ,  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$

4. 相位差：描述两个同频正弦量之间的相位关系。

$$\text{设 } u_1 = U_m \sin(\omega t + Q_{u1}), \quad i_2 = I_m \sin(\omega t + Q_{i2}).$$

$$\text{相位差 } Q_{12} = (\omega t + Q_{u1}) - (\omega t + Q_{i2}) = Q_{u1} - Q_{i2}.$$

当  $Q_{12} > 0$  时，称为  $u_1$  超前  $i_2$ ；当  $Q_{12} < 0$ ，称为  $u_1$  滞后  $i_2$ ；当  $Q_{12} = 0$ ，称为  $u_1$  与  $i_2$  同相。

5.注意：由于正弦量的初相与设定的参考方向有关，当改设某一正弦量的参考方向时，则该正弦量的初相将改变 $\pi$ ，它与其他正弦量的相位差也将相应的改变 $\pi$ 。

### (三) 单一元件的阻抗与导纳

在线性时不变的正弦稳态电路中，全部电压、电流都是同一频率的正弦量。

1.定义：

(1) 阻抗：元件两端的电压相量 $\dot{U}$ 与电流相量 $\dot{I}$ 的比值定义为元件的阻抗 $Z$ 。

(2) 导纳：元件两端的电流相量 $\dot{I}$ 与电压相量 $\dot{U}$ 的比值定义为一端口的导纳 $Y$ 。

阻抗和导纳互为倒数。

2. 电阻元件的阻抗与导纳

当有正弦电流 $i_R = \sqrt{2}I_R \sin(\omega t + \varphi_i)$ 通过电阻时，根据欧姆定律，电阻两端的电压 $u = \sqrt{2}RI_R \sin(\omega t + \varphi_i)$ 。

令电压相量 $\dot{U} = U_R \angle \varphi_u$ ，则相量形式有：

$$\dot{U} = U_R \angle \varphi_u = RI_R \angle \varphi_i = RI_R \dot{I} \quad \text{或} \quad \dot{I} = GU_R$$

$$U_R = RI_R$$

$$G = \frac{1}{R}$$

(1) 阻抗： $Z_R = R$

(2) 导纳： $Y_G = G = \frac{1}{R}$

(3) 性质: 电阻两端的电压与流经电阻的电流同相。

### 3. 电感元件的阻抗与导纳

当有正弦电流  $i_L = \sqrt{2} I_L \sin(\omega t + Q_i)$  通过电感  $L$  时, 根据  $u_L = L \frac{di_L}{dt}$  可得:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \sqrt{2} \omega L I_L \sin(\omega t + Q_i + 90^\circ)$$

令电压相量  $\dot{U}_L = U_L \angle Q_u$ , 则相量形式有:

$$\dot{U}_L = j \omega L \dot{I}_L$$

$$U_L = \omega L I_L$$

$$Q_u = Q_i + 90^\circ$$

(1) 阻抗 (感抗):  $Z_L = j \omega L$

(2) 导纳 (感纳):  $Y_L = -j \frac{1}{\omega L}$

(3) 性质: 电感两端的电压超前流经它的电流  $90^\circ$ 。

### 4. 电容元件的阻抗与导纳

当有正弦电压  $u = \sqrt{2} U_C \sin(\omega t + Q_u)$  施加在电容  $C$  两端时, 根据  $i_C = C \frac{du}{dt}$

可得:

$$i_C = C \frac{du}{dt} = \sqrt{2} \omega C U_C \sin(\omega t + Q_u + 90^\circ)$$

令电压相量  $\dot{I}_C = I_C \angle Q_i$ , 则相量形式有:

$$\dot{U}_C = -j \frac{1}{\text{负}C} \dot{I}_L$$

$$U_C = \frac{1}{\text{负}C} I_L$$

$$Q_u = Q_i - 90^\circ$$

(1) 阻抗 (容抗):  $Z_C = -j \frac{1}{\text{负}C}$

(2) 导纳 (容纳):  $Y_C = j \text{负}C$

(3) 性质: 电感两端的电压滞后流经它的电流  $90^\circ$ 。

### 【例题实战】

1. 已知  $F_1 = -4 + 3j$ ,  $F_2 = 4 + 7j$ ,  $F = F_1 - F_2$  为 ( )。

A.  $F = -8 + 4j$

B.  $F = -10j$

C.  $F = -8 - 4j$

D.  $F = 10j$

2. 已知  $F_1 = 9 \angle 30^\circ$ ,  $F_2 = 3 \angle 60^\circ$ , 求  $F_1 / F_2$  为 ( )。

A.  $3 \angle 30^\circ$

B.  $6 \angle -30^\circ$

C.  $3 \angle -30^\circ$

D.  $6 \angle 30^\circ$

3. 已知  $F_1 = -4 + 3j$ ,  $F_2 = 4 + 7j$ ,  $F = F_1 - F_2$  为 ( )。

A.  $F = -8 + 4j$

B.  $F = -10j$

C.  $F = -8 - 4j$

D.  $F = 10j$

4. 已知  $F_1 = 9 \angle 30^\circ$ ,  $F_2 = 3 \angle 60^\circ$ , 求  $F_1 / F_2$  为 ( )。

A.  $3 \angle 30^\circ$

B.  $6 \angle -30^\circ$

C.  $3 \angle -30^\circ$

D.  $6 \angle 30^\circ$

5. 若  $i_1 = 10 \sin(\text{负}t + 30^\circ) \text{A}$ ,  $i_2 = 20 \sin(\text{负}t - 10^\circ) \text{A}$ , 则  $i_1$  的相位比  $i_2$  超前 ( )。

A.  $20$

B.  $-20$

C.  $40$

D.  $-40$

6. 在正弦电路中, 纯电感元件上电压超前其电流  $90^\circ$  的相位关系为 ( )

A. 永远正确

B.在电压、电流为关联参考方向的前提下才成立

C.与参考方向无关

D.与频率有关

7.在正弦电路中, 频率  $f$  越大, 感抗越小, 容抗越大。( )

A.正确

B.错误

8.已知RC 串联电路的电容电压  $U_C = 6V$ , 电阻电压  $U_R = 8V$ , 则端电压  $U$  为 ( )。

A. 14V

B. 12V

C. 10V

D. 8V

### 【答案解析】

1. 【答案】A。

2. 【答案】B。

3. 【答案】C。

4. 【答案】C。

5. 【答案】C。

6. 【答案】B。

7. 【答案】B。

8. 【答案】C。

## 核心知识点 8 三相电路

### (一) 对称三相电源

1. 定义: 对称三相电源是由 3 个同频率、等幅值、初相依次滞后  $120^\circ$  的正弦电压源连接成星形 (Y) 或三角形 ( $\Delta$ ) 组成的电源。

2. 表达式

(1) 瞬时表达式

$$u_A = \sqrt{2} U \sin \omega t$$

$$u_B = \sqrt{2} U \sin(\omega t - 120^\circ)$$

报名专线: 400-6300-999

$$u_c = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 120^\circ)$$

(2) 相量表达式

$$\dot{U}_A = U \angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120^\circ$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120^\circ$$

3. 对称三相电源的特点

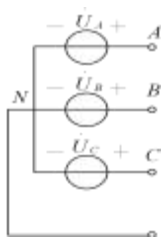
$$u_A + u_B + u_C = 0$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$$

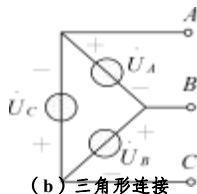
4. 相序：三相电源电压达到同一值（如振幅）的先后次序称为相序。A-B-C-A 依次相差  $120^\circ$ ，称为正序或顺序；反之，A-C-B-A 依次相差  $120^\circ$  称为负序或逆序。

## (二) 三相电源的连接

三相电源有星形连接如图 (a) 和三角形连接如图 (b) 两种方式。三角形电源不能引出中性线。



(a) 星形连接



(b) 三角形连接

## (三) 对称三相电路

1. 对称三相负载

当 3 个复阻抗相等时, 就称为对称三相负载。

## 2. 对称三相电路的连接

三相电源和负载均对称的电路为对称三相电路。

三相电源有 Y 形和  $\Delta$  形连接两种连接方式, 负载也有 Y 形和  $\Delta$  形两种连接方式,

如图 7-3 所示, 三相电路共有 Y-Y、Y- $\Delta$ 、 $\Delta$ -Y 和  $\Delta$ - $\Delta$  四种连接方式。

## (四) 线电压(电流)和相电压(电流)的关系

### 1. 星形连接

(1) 电压: 线电压为相电压的  $\sqrt{3}$  倍, 且相位领先相电压  $30^\circ$ 。

(2) 电流: 线电流等于相电流。

### 2. 三角形连接

1. 电压: 线电压等于相电压。

2. 电流: 线电流为相电流的  $\sqrt{3}$  倍, 且相位滞后对应的相电流  $30^\circ$ 。

## 【例题实战】

1. 三相对称电路是指( )

A. 电源对称的电路

B. 负载对称的电路

C. 电源和负载均对称电路

D. 电源负载均不对称电路

2. 已知对称三相电源的相电压  $u_A = 10\sin(\omega t + 60^\circ)$  V, 相序为 A-B-C, 当电源为星形连接时线电压为( ) V。

A.  $17.32\sin(\omega t + 90^\circ)$

B.  $10\sin(\omega t + 90^\circ)$

C.  $17.32\sin(\omega t - 30^\circ)$

D.  $17.32\sin(\omega t + 150^\circ)$

3. 三相负载对称的条件是( )。

A. 每相复阻抗相等

B. 每相阻抗值相等

C.每相阻抗值相等并且阻抗角互差  $120^\circ$

D.每相阻抗值不等

【答案解析】

1. 【答案】 C。

2. 【答案】 A 。解析：线电压为相电压的  $\sqrt{3}$  倍，且相位领先相电压  $30^\circ$  。

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3}U \angle 30^\circ .$$

3. 【答案】 A。



## 二、电磁场

### 核心知识点 1 静电场的分析计算

#### (一) 静电场的基本概念

##### 1. 库伦定律

(1) 内容：真空中两个点电荷之间的作用力的大小与两点电荷电量之积成正比，与距离平方成反比，力的方向沿着它们的连线，同号电荷之间是斥力，异号电荷之间是引力。这一规律称为库伦定律。

(2) 公式：

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

F 叫库仑力或静电力，也叫电场力，F 可以是引力，也可以是斥力。

(3) 适用条件：真空中；点电荷。

##### 2. 电场强度E

(1) 定义：空间一点的电场强度定义为该点的单位正试验电荷所受到的力。用来描述电场强弱和方向的物理量。

(2) 单位：伏特/米 (V/m) 或牛顿/库仑 (N/C)。

(3) 定义式：

$$E = \frac{F}{q}$$

适用于一切电场。电场强度大小取决于电场本身，与q和F无关。

(4) 方向：规定电场中某点的场强方向跟正电荷在该点的受力方向相同。

#### (二) 静电场的基本定律

##### 1. 静电场的环路定理

在静电场中，沿闭合路径移动电荷，电场力所作的功恒为零。换句话说，电场强度的环路积分恒等于零。即：

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

## 2. 高斯定理

介质中穿过任一闭合面的电位移的通量等于该闭合面包围的自由电荷，而与束缚电荷（极化电荷）无关。

$$\int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q$$

上式又称为介质中的高斯定律的积分形式，利用矢量恒等式不难推出其微分形式为：

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

微分形式表明：静电场中任一点上的电位移矢量的散度等于该点的自由电荷体密度。

## （三）静电场的基本方程和边界条件

### 1. 基本方程和基本特性

	积分形式	微分形式
静电场的环路定理	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = 0$
高斯定律	$\int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$

静电场的基本特性：通过静电场的环路定理可以看出，静电场是一个无旋场；通过高斯定律可以看出，静电场是一个有源场；综合来看，静电场是一个有源无旋场。

### 2. 边界条件

$$E_{1t} = E_{2t}$$

$$D_{2n} - D_{1n} = \rho_s$$

## 【例题实战】

1. 静电场中电场强度相等的地方, 电位 ( )

A. 相等      B. 不相等      C. 可任意      D. 为零

2. 两个电荷之间的电场力的大小与 ( ) 的乘积成正比。

A. 电量      B. 电压  
C. 电场强度      D. 电位差

3. 高斯定律积分式中的  $q$  的含义是指 ( )。

A. 空间所有的电荷  
B. 闭合面包围的自由电荷  
C. 闭合面包围的极化电荷  
D. 闭合面包围的所有电荷

### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析：场强与电位没有必然联系。

2. 【答案】A。解析：根据库伦定律公式。

3. 【答案】B。解析：介质中穿过任一闭合面的电位移的通量等于该闭合面包围的自由电荷，而与束缚电荷（极化电荷）无关。

## 核心知识点 2 恒定电场分析

### (一) 恒定电场的基本方程

	积分形式	微分形式
环路定理	$\oint E \cdot dl = 0$	$\nabla \times E = 0$
电流连续性原理	$\int_S J \cdot dS = 0$	$\nabla \cdot J = 0$

恒定电场的基本特性：通过环路定理可以看出，恒定电场是一个无旋场；通过电流连续性原理可以看出，恒定电场是一个无源场；综合来看，恒定电场是一个无源无旋场。

## (二) 恒定电场的边界条件

$$J_{1n} = J_{2n}$$

$$E_{1t} = E_{2t}$$

### 【例题实战】

1. (多选) 恒定电场的电流连续性原理说明了 ( )。
- A. 电流线是连续的                      B. 电流线是闭合的   C. 电场线是闭合的  
D. 电荷是守恒的
2. (多选) 下列关于恒定电场边界条件的说法，正确的是 ( )。
- A. 电流密度矢量的法向分量是连续的  
B. 电流密度矢量的切向分量是连续的  
C. 电场强度矢量的切向分量是连续的  
D. 电场强度矢量的法向分量是连续的
3. (多选) 下列 ( ) 反映了恒定电场电流线是连续的。
- A. 高斯定律                              B. 电流连续性原理  
C. 环路定理                              D. 库仑定律

### 【答案解析】

1. 【答案】ABD。解析：电流线是连续闭合的。它和电场线不同，电流线没有起点和终点，这一结论称为电流连续性原理。由此可得电荷守恒定律。
2. 【答案】AC。解析： $J_{1n} = J_{2n}$ ， $E_{1t} = E_{2t}$ 。
3. 【答案】AB。解析：电流连续性原理又叫高斯定理。

## 核心知识点 3 恒定磁场分析

## (一) 静电场的基本定律

### 1. 磁通的连续性原理

穿过磁场中给定曲面  $S$  的磁感应强度的通量为磁通。

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

若  $S$  为闭合曲面

$$\Phi = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

由散度公式得到:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

该式表明, 真空中恒定磁场通过任一闭合面的磁通为零, 真空中恒定磁场的磁感应强度的散度处处为零。因此, 真空中恒定磁场是无散场。

注意: 磁通连续性原理也称磁场的高斯定理, 表明磁力线是无头无尾的闭合曲线, 这一性质建立在自然界不存在磁荷的基础上, 原理适用于恒定磁场也适用于时变场。

### 2. 安培环路定理

安培环路定理如下式所示

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_i I$$

由斯托克斯公式:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

该式表明, 真空中恒定磁场的磁感应强度沿任一闭合曲线的环量等于曲线包围的电流与真空磁导率的乘积, 而与路径的形状和大小无关。因此, 真空中恒定磁场是有旋场。

注意:

(1) 安培环路定理表达式中的电流是指闭合曲线所包围, 并穿过的电流, 不包括闭合曲线以外的电流。

(2) 安培环路定理表达式中的磁感应强度  $B$  是闭合曲线内外所有电流产生的磁感应强度。

## (二) 静电场的基本方程和边界条件

	积分形式	微分形式
安培环路定理	$\oint_l B \cdot dl = \mu_0 I$	$\nabla \times H = J$
磁通连续性原理	$\oint_S B \cdot dS = 0$	$\nabla \cdot B = 0$

恒定磁场的基本特性：通过安培环路定理可以看出，恒定磁场是一个有旋场；通过磁通连续性原理可以看出，恒定磁场是一个无源场；综上，恒定磁场是一个无源有旋场。

边界条件：

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$H_{1t} - H_{2t} = J_S$$

### 【例题实战】

- 反映磁力线是闭合曲线的定理是 ( )。
  - 安培力定律
  - 磁通连续性原理
  - 安培环路定理
  - 电流连续性原理
- 揭示恒定磁场是有旋场的是 ( )。
  - 安培力定律
  - 磁通连续性原理
  - 安培环路定理
  - 电流连续性原理
- 恒定磁场的边界条件中，( ) 的法向边界是连续的。
  - 磁场强度
  - 磁感应强度
  - 磁化强度
  - 磁通量

### 【答案解析】

1. 【答案】B。解析：磁通连续性原理也称磁场的高斯定理，表明磁力线是无头无尾的闭合曲线。

2. 【答案】C。解析：通过安培环路定理可以看出，恒定磁场是一个有旋场；通过磁通连续性原理可以看出，恒定磁场是一个无源场。

3. 【答案】B。解析： $B_{1n} = B_{2n}$ 。

## 核心知识点 4 时变电磁场

### （一）时变电磁场的基本定律

#### 1. 全电流连续性原理

引入位移电流以后，时变电流仍然是连续的。由于此时包括了传导电流、运流电流及位移电流，因此，全电流连续性原理如下式所示。

$$\int_S (J + J_D) \, dS = 0 \quad \text{牵} \quad \nabla \cdot (J + J_D) = 0$$

上式是积分形式和微分形式的全电流连续性原理。它说明，在时变场中，全电流密度矢量线无源，它们是永远闭合的，即在传导电流中断处，必有运流电流、或位移电流接续。

#### 2. 全电流定律

在时变电场中，由于位移电流存在，麦克斯韦认为位移电流也可产生磁场，因此前述的安培环路定律变为：

$$\oint_l H \, dl = \int_S (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot dS$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

上两式称为全电流定律。它说明，磁场强度沿任意闭合有向曲线的线积分，等于穿过该有向曲线所界定的曲面的全电流。即时变磁场是由传导电流，运流电流以及位移电流共同产生的。该式又称为麦克斯韦第一积分方程。

已知位移电流是由时变电场形成的，由此可见，时变电场可以产生时变磁场。麦克斯韦第一方程表明，不仅运动电荷将产生时变磁场，时变电场也将产生时变磁场。它说明电与磁二者间的关系，因而麦克斯韦第一方程是描述时变电磁场中不同的两个方面——电场与磁场关系的方程之一，它是解决时变电磁场问题的一个基本依据。

### 3. 电磁感应定律

下式称为电磁感应定律，它表明时变磁场可以产生时变电场。因此，麦克斯韦引入位移电流概念以后，预见时变电场与时变磁场相互转化的特性可能会在空间形成电磁波。

$$\int_l E \cdot dl = \int_s -\frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$$

上式又称为麦克斯韦第二积分方程。

它说明，电场强度沿任意有向闭合曲线的线积分，等于该有向闭合曲线轮廓内所感生的电动势。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

此即麦克斯韦第二微分方程，或称为微分形式电磁感应定律。

麦克斯韦第一方程阐明了时变的电场产生时变的磁场，而麦克斯韦第二方程则阐明了时变的磁场产生时变的电场。因而麦克斯韦第一与第二方程从不同的方面揭示了时变电磁场中电场与磁场之间的相互联系。时变的电场将在空间产生时变的磁场，而时变的磁场又将在空间产生时变的电场，麦克斯韦就是根据这一结论，预见了电磁波的存在。

### (二) 时变电磁场的基本方程和边界条件

	积分形式	微分形式
全电流定律	$\int_l H \cdot dl = \int_s (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot dS$	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
电磁感应定律	$\int_l E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$



<b>磁通连续性原理</b>	$\int_S B \, dS = 0$	$\nabla \cdot B = 0$
<b>高斯定律</b>	$\int_S D \, dS = q$	$\nabla \cdot D = \rho$

时变电场是有旋有散的，时变磁场是有旋无散的。但是，时变电磁场中的电场与磁场是不可分割的，因此，时变电磁场是有旋有散场。电场线与磁场线相互交链，自行闭合，从而在空间形成电磁波。时变电场的方向与时变磁场的方向处处相互垂直。

边界条件:

与静电场、恒定场类似，时变电磁场中，在空间不同媒质的分界面上场量可能要发生突变。时变电磁场中的边界条件推导方法与静电场、恒定场类似，可得：

1.  $B_{1n} = B_{2n}$  称为磁感应强度的法向分量连续
2.  $D_{1n} - D_{2n} = \sigma$  称为电位移矢量的法向分量连续
3.  $H_{2t} - H_{1t} = J_s$  称为磁场强度的切向分量连续
4.  $E_{1t} = E_{2t}$  称为电场强度的切向分量连续
5. 电介质与理想导体交界面的边界条件:

由于电磁波不能透入理想导体内部，故导体内将不存在电场与磁场。

### 【例题实战】

1. 法拉第电磁感应定律说明了 ( ) 。  
A. 变化的电场产生磁场  
B. 变化的磁场产生电场  
C. 变化的电场产生电流  
D. 变化的磁场产生电荷
2. (多选) 麦氏方程中的全电流定律揭示了传导电流和 ( ) 是产生磁场的涡旋源。  
A. 位移电流  
B. 变化的磁场  
C. 运流电流  
D. 变化的磁通
3. 高斯定律和磁通连续性原理在时变场和静态场都可以使用。 ( )

A.正确

B.错误

4.全电流定律是将静态场的安培环路定律修正以后的结果，它提示了变化的电场产生磁场。（ ）

A.正确

B.错误

5.电强感应定律所揭示的含义是：变化的电场产生磁场。（ ）

A.正确

B.错误

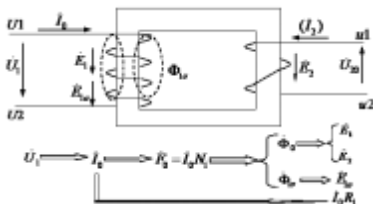
**【答案解析】**

- 1.【答案】B。解析：电磁感应定律，它表明时变磁场可以产生时变电场。
- 2.【答案】AC。解析：时变磁场是由传导电流，运流电流以及位移电流共同产生的。
- 3.【答案】A。解析：适用于所有的场。
- 4.【答案】A。解析：麦克斯韦第一方程表明，不仅运动电荷将产生时变磁场，时变电场也将产生时变磁场。。
- 5.【答案】B。解析：电磁感应定律，它表明时变磁场可以产生时变电场。

# 三、电机

## 核心知识点 1 变压器运行分析

### (一) 变压器的空载运行



实际上变压器空载运行时，由空载电流建立主磁通，所以空载电流就是励磁电流。

空载电流  $I_0$  激励的磁通分为两部分：一部分为主磁通，它同时与原边、副边绕组交链并产生感应电势  $E_1$  和  $E_2$ ；另一部分通过原边绕组周围的空间形成闭合回路，只与原边绕组交链而不与副边绕组交链，称为原边绕组漏磁通。它在原边绕组中产生的感应电势称为漏磁电势，由于漏磁通经过空气闭路，磁路不会饱和，又由于漏磁通经过的路径磁阻很大，因此相应的漏磁抗和漏磁电势是很小的。

$$U_1 = -E_1 - E_{1\sigma} + I_0 R_1 = -E_1 + I_0 R_1 + j I_0 X_1 = -E_1 + Z_1 I_0$$

如果不考虑  $U_1$  和  $E_1$  的方向， $U_1 \approx E_1$

再由一、二次侧感应电动势有效值大小：

$$E_1 = \sqrt{2} \pi N_1 f \Phi_m = 4.44 N_1 f \Phi_m$$

$$E_2 = \sqrt{2} \pi N_2 f \Phi_m = 4.44 N_2 f \Phi_m$$

$$\text{可得 } U_1 = 4.44 N_1 f \Phi_m$$

上式表明，一定幅值的外加电压  $U_1$ ，产生一定幅值的交变磁通  $\Phi_m$ ，以建立与电压平衡的感应电势。即在频率  $f$  和匝数  $N_1$  不变的条件下，电压  $U_1$  正比于磁通  $\Phi_m$  或者说，若外加电压  $U_1$  不变，主磁通  $\Phi_m$  也为不变。

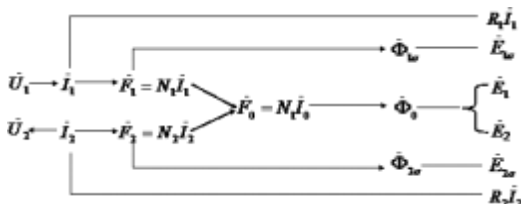
## (二) 变压器的负载运行

负载运行是指变压器的原边绕组接在电源上，副边绕组接上负载后输出电流的状态。

1. 变压器的变压比用  $k$  表示，它定义为原边绕组电动势  $E_1$  与副边绕组电动势  $E_2$  之比。变压器的变压比等于原边、副边绕组的匝数之比。

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

2. 负载运行时的电磁关系：



磁动势平衡方程式： $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$

即： $N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0$

$$\dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \dot{I}_{1L} + \dot{I}_0$$

上式表明, 在负载运行时, 变压器一次侧电流有两个分量, 前者负载分量是为了抵消二次侧磁动势, 后者励磁分量是为了建立变压器的主磁通。

换言之, 当二次侧绕组流通电流  $\dot{I}_2$  时, 一次绕组便自动流入负载分量电流  $\dot{I}_{1L}$ , 以满足磁动势平衡。

3. 电压平衡方程式:  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$

### 【例题实战】

1. 一台单相变压器,  $U_{1N}/U_{2N}=220/110V$ , 如果把一次侧接到 110V 的电源上运行, 电源频率不变, 则变压器的主磁通将 ( )。

- A. 增大      B. 减小      C. 不变      D. 为零

2. 变压器的电压与频率都增加 5% 时, 穿过铁芯线圈的主磁通 ( )。

- A. 增加      B. 减少      C. 基本不变      D. 不能确定

3. 变压器在负载运行时, 作用在铁心上用以建立主磁通的激磁磁动势是 ( )。

- A. 一次绕组产生的磁动势  
B. 二次绕组产生的磁动势  
C. 一次和二次绕组产生的合成磁动势  
D. 以上都不对

### 【答案解析】

1. 【答案】B。解析: 根据公式  $U_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ , 一次侧电压变小, 那么主磁通也变小。

2. 【答案】C。解析：根据公式  $U_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ ，主磁通不变。

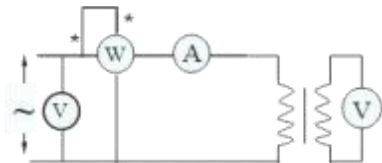
3. 【答案】C

## 核心知识点 2 变压器的参数测定

对已制造出的变压器通过空载和短路实验的方法来测定参数。

### (一) 空载试验

1. 目的：通过测量空载电流和一、二次电压及空载功率来计算变比、空载电流百分数、铁损和励磁阻抗。



2. 要求及分析：

- (1) 低压侧加电压，高压侧开路；
- (2) 电压  $U_1$  在  $0 \sim 1.2 U_N$  范围内单方向调节，测出  $U_{20}$ 、 $I_0$  和  $P_0$ ；
- (3) 忽略  $R_1$  和  $X_1$ ，即  $P_0 \sim P_{Fe}$ 。
- (4) 求出参数

$$k = \frac{U_{20}}{U_{1N}}, I_0 \% = \frac{I_0}{I_{1N}} \times 100\%$$

$$Z_m = \frac{U_{1N}}{I_0}, R_m = \frac{P_0}{I_0^2}, X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

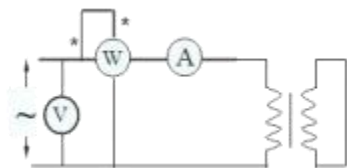
- (5) 空载电流和空载功率必须是额定电压时的值，并以此求取励磁参数；
- (6) 若要得到高压侧参数，须折算；

(7) 对三相变压器，各公式中的电压、电流和功率均为相值；

空载时电流很小，铜耗可以忽略，但磁通基本为额定值，故铁耗与变压器额定运行情况相仿，所以空载损耗可以近似看成是铁耗。

## (二) 短路试验

1. 目的：通过测量短路电流、短路电压及短路功率来计算变压器的短路电压百分数、铜损和短路阻抗。



2. 要求及分析：

(1) 高压侧加电压，低压侧短路；

(2) 通过调节电压，让电流  $I_k$  在  $0 \sim 1.3 I_N$  范围内变化，测出对应的  $U_k$ ， $I_k$  和  $P_k$ ；

(3) 同时记录实验室的室温；

(4) 由于外加电压很小，主磁通很少，铁损耗很少，忽略铁损，认为  $P_k = P_{Cu}$ 。

(5) 参数计算

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_{kN}}{I_{1N}}, R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{P_{kN}}{I_{1N}^2}, X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

对图所示的 T 型等效电路中取：

$$R_1 \sim R_2 = \frac{1}{2} R_k, X_1 \sim X_2 = \frac{1}{2} X_k$$

(6) 温度折算：电阻应换算到基准工作温度时的数值。

(7) 若要得到低压侧参数, 须折算;

(8) 对三相变压器, 各公式中的电压、电流和功率均为相值;

短路试验时绕组上所加的电压比较小, 所以变压器的磁通也比较小, 这时铁耗就比其额定运行时的值要小得多。而短路试验时的电流约为额定值, 因而此时变压器的铜耗与其额定运行时的值相仿, 比这时的铁耗大得多, 所以短路试验损耗可以近似看成是铜耗。

### 【例题实战】

1. 某变压器的空载试验中可以测出参数  $U_0$ 、 $I_0$ 、 $P_0$ 、 $U_{20\%}$ , 求励磁阻抗的大小为 ( )。

A.  $P_0/I_0^2$

B.  $U_0/I_0$

C.  $(X_m^2 - R_m^2)^{1/2}$

D. 无法确定

2. 下列说法正确的是 ( )。

A. 变压器短路试验的目的是为了测取变压器的  $Z_K$ ,  $X_K$ ,  $r_K$ 。

B. 变压器中的铁耗为可变损耗, 因为它随电源电压而变

C. 变压器中的铜耗为不变损耗, 因为折算时保持他不变

D. 变压器带纯电阻负载时, 当负载电流增加, 输出电压一定不变

3. 变压器空载损耗 ( )。

A. 全部为铜损耗

B. 全部为铁损耗

C. 主要为铜损耗

D. 主要为铁损耗

### 【答案解析】



1. 【答案】B。

2. 【答案】A。解析：铁耗为不变损耗，铜耗为可变损耗，带纯电阻负载输出电压降低。

3. 【答案】D

## 核心知识点 3 变压器的运行性能

### （一）电压变化率（调整率）

1. 定义：是指一次侧加50Hz额定电压、二次空载电压与带负载后在某功率因数下的二次电压之差，与二次额定电压的比值，即：

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}}$$

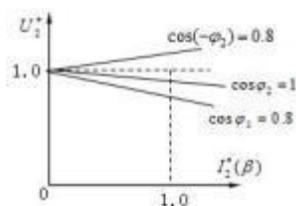
电压变化率是表征变压器运行性能的重要指标之一，它的大小反映了供电电压的稳定性。常用的电力变压器，以功率因数0.8（滞后）接上额定负载时，电压变化率为5~8%。

2. 用相量图可以推导出电压变化率的表达式：

$$\Delta U = \beta(R_1^* \cos Q_2 + X_1^* \sin Q_2)$$

式中  $\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$  称为负载系数。式中， $\beta = 0$ ，空载； $\beta = 1$ ，满载。

由表达式可知，电压变化率的大小与负载大小、性质及变压器的本身参数有关。



由公式可得出如下结论:

(1) 纯电阻负载时, 即  $\cos Q_2 = 1$  时,  $\Delta U$  为正值, 且很小;

(2) 感性负载时,  $Q_2 > 0$ ,  $\cos Q_2 > 0$ ,  $\sin Q_2 > 0$ ,  $\Delta U$  为正值, 二次侧端电压  $U_2$  随负载电流  $I_2$  的增大而下降;

(3) 容性负载时,  $Q_2 < 0$ ,  $\cos Q_2 > 0$ ,  $\sin Q_2 < 0$ , 若  $R_k^* \cos Q_2 < X_k^* \sin Q_2$  的绝对值, 则  $\Delta U$  为零或者负值, 二次侧端电压  $U_2$  随负载电流  $I_2$  的增大而升高。

## (二) 损耗

变压器损耗是现代物理学领域的概念, 是指空载损耗  $P_0$ 、短路损耗  $P_k$  及杂散损耗  $P$  之和。

### 1. 空载损耗

当用额定电压施加于变压器的一个绕组上, 而其余的绕组均为开路时, 变压器所吸收的有功功率叫空载损耗。空载损耗又叫变压器的铁损, 是指发生于变压器铁芯叠片内, 周期性变化的磁力线通过材料时, 由材料的磁滞和涡流产生的, 其大小与运行电压和分接头电压有关。

铁损耗与外加电压大小有关, 而与负载大小基本无关, 故也称为不变损耗。

### 2. 短路损耗

对双绕组变压器来说，当以额定电流通过变压器的一个绕组，而另一个绕组短接时变压器所吸收的有功功率叫做变压器的短路损耗。短路损耗又称变压器的铜损，也称负载损耗，是由变压器绕组的电阻引起的，是由经过绕组的负荷电流产生的。

铜损耗与经过绕组的负荷电流有关，故是可变损耗。

### 3. 杂散损耗

是指发生在引线和外壳以及其他结构性的金属零件上的损耗，杂散损耗与负荷有关。

一般来说，变压器的空载损耗和短路损耗占到变压器损耗的绝大部分，所以在计算变压器损耗时，只考虑这两部分。

### (三) 效率及效率特性

效率是指变压器的输出功率与输入功率的比值。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos Q_2}{\beta S_N \cos Q_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0}$$

其中  $S_N$  为变压器的额定容量， $p_{kN}$  为短路损耗（铜耗）， $p_0$  为空载损耗（铁耗）。

该式是按单相变压器推导的，也适用于三相变压器，对于三相变压器计算效率，参数应取三相值。

效率大小反映变压器运行的经济性能的好坏，是表征变压器运行性能的重要指标之一。

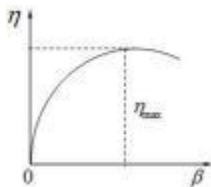
变压器效率的大小与负载的大小、功率因数及变压器本身参数有关，故变压器效率的大小不是常数。为了求取最大效率，对公式进行求导，取  $\frac{d\eta}{d\beta} = 0$ ，求极值条件为

$p_0 = \beta^2 p_{kN}$ 。变压器最大效率  $\eta_{\max}$  的条件为：可变损耗等于不变损耗，即铜耗等

于铁耗。此时最大效率发生在  $\beta = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}$ ，一般电力变压器的  $p_0/p_{kN} = 1/4 \sim 1/3$ ，故最大

效率发生在  $\beta = 0.5 \sim 0.6$  左右。

效率特性：在功率因数一定时，变压器的效率与负载电流之间的关系  $\eta = f(\beta)$ ，称为变压器的效率特性。一般负荷系数  $\beta = 0.5 \sim 0.6$  左右，为效率最高点。变压器不设计成  $\beta = 1$  时效率最大，这是因为变压器并非经常满载运行，负载系数随季节、昼夜而变化，因而铜耗也是随之变化的，而铁耗在变压器投入运行时，总是存在的，故常常设计成较小的铁耗，这对提高全年的能量效率非常有利。



### 【例题实战】

1. 变压器一次绕组接额定电压，二次绕组的输出电压高于额定电压，其负载性质是 ( )。

- A. 纯阻负载      B. 容性负载      C. 感性负载      D. 都有可能

**【答案解析】**

- 1.【答案】B

## 四、电力系统分析

### 核心知识点 1 电力系统的电压等级

#### (一) 电力系统额定电压

电力系统中所说的额定电压均指额定线电压（有效值）

我国网络额定电压 $U_N$ 一般有：3kV、6kV、10kV、35kV、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV。目前，我国最高的交流电压等级为1000kV，直流最高电压等级为 $\pm 800$ kV。

根据电压等级的高低，目前电力网大体分为低压、中压、高压、超高压和特高压5种。电压等级在1kV以下的电力网称为低压电网；3kV、6kV、10kV、35kV的电力网称为中压电网；110kV、220kV的电力网称为高压电网；330kV、500kV、750kV、1000kV的电力网称为超高压电网，1000kV以上的电力网称为特高压电网。

#### (二) 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压为 $U_N$ ，也是其他元件（发电机、变压器、电力线路）的参考电压。

#### (三) 电力线路的额定电压

电力线路的额定电压等于用电设备的额定电压 $U_N$ 。因用电设备的容许电压偏移一般为 $\pm 5\%$ ，沿线路的电压降落一般为10%，因此线路始端电压为额定值的105%，线路末端电压为额定值的95%，电力线路的额定电压为始末两端电压的平均值，即为 $U_N$ 。

#### (四) 发电机的额定电压

发电机往往接在线路始端，所以发电机的额定电压为线路额定电压的 1.05 倍（即  $1.05U_N$ ）。

### （五）变压器的额定电压

（1）变压器的一次侧接电力线路，相当于用电设备，受前端线路影响。而变压器一次侧一般只与电力线路或者发电机相连，所以变压器一次侧电压可能等于电力线路的额定电压  $U_N$ ，或者等于发电机额定电压  $1.05U_N$ 。

（2）变压器的二次侧向负荷供电，相当于发电机，需要向后续电力线路供电，必须要考虑电力线路上的电压损耗，要在后续电力线路额定电压基础上提高 5%。不仅如此，变压器内部也存在损耗，该损耗最终归算至二次侧，数值约为电力线路额定电压 5%。因此一般情况变压器二次侧的额定电压等于线路额定电压的 1.1 倍，即  $1.1U_N$ 。

注意，有时二次侧直接与用电设备相连或者有时变压器自身漏抗很小（短路电压百分比小于 7%），在这种特殊情况下，二次侧的额定电压应该等于线路额定电压的 1.05 倍，即  $1.05U_N$ 。但是要注意，即使变压器直接连接用电设备并且自身漏抗很小也一定会存在电压损耗，为了使计算结果更加符合实际情况，变压器二次额定电压最小也应为线路额定电压的 1.05 倍，即  $1.05U_N$ 。

### 【例题实战】

1. 一台将 220kV 电压降为 110kV 的降压变压器，两侧均与线路相连，这台变压器的额定变比为（ ）。

A. 220/110

B. 242/110

C. 220/121

D. 242/121

2. 发电机作为电源一般将额定电压提高（ ），以补偿输电过程的电压损耗。

A. 3%

B. 5%

C. 10%

D. 5%

3. 在下面给出的各组电压中，完全属于电力系统额定电压的一组是（ ）。

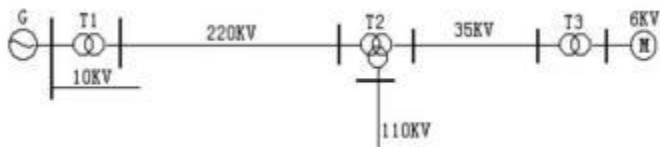
A. 500kV、230kV、121kV、37kV、10.5kV

B. 525kV、230kV、115kV、37kV、10.5kV

C. 525kV、242kV、121kV、38.5kV、11kV

D. 500kV、220kV、110kV、35kV、10kV

4. 下图所示简单电力系统中，输电线路和电动机的额定电压已经标出，则此时发电机和变压器的额定电压应为（ ）。



A. G: 10kV; T1: 10/242kV; T2: 209/121/38.5kV; T3: 33.25/6.3kV。

B. G: 10.5kV; T1: 10.5/231kV; T2: 209/115.5/36.75kV; T3: 33.25/6.3kV。

C. G: 10.5kV; T1: 10.5/230kV; T2: 230/115/37kV; T3: 37/6.3kV。

D. G: 10.5kV; T1: 10.5/242kV; T2: 220/121/38.5kV; T3: 35/6.3kV。



### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析：连接线路的降压变压器一次侧电压即为线路电压。降压变压器二次侧经过输电线路连接负荷（用电设备），变压器二次侧额定电压取比线路额定电压高10%，因此额定变比为220/121kV。

2. 【答案】B。解析：发电机端口电压是额定电压的1.05倍。

3. 【答案】D。解析：我国的电力网额定电压等级有：0.22，0.38，3，6，10，35，60，110，220，330，500（kV）。

4. 【答案】D。解析：发电机出口电压比电网电压升高5%，故发电机电压为10.5kV。一次侧与发电机相连的变压器一次侧电压即为发电机机端电压，一次侧与线路相连的变压器一次侧电压即为线路额定电压，而二次侧与线路相连的变压器二次侧额定电压取比线路额定电压高10%。故T1的变比10.5/242kV，T2的变比220/121/38.5kV。二次侧直接与用电设备相连的变压器二次侧电压比线路额定电压高5%，故T3的变比35/6.3kV。

## 核心知识点 2 变压器的参数和电路模型

### (一) 变压器 $\pi$ 型等效电路

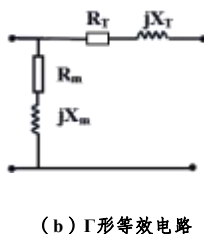
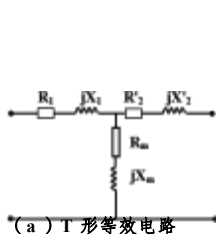
双绕组变压器的 T 形等效电路如图 2-2a 所示，由于励磁支路阻抗

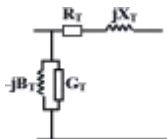
$Z_m = R_m + jX_m$  相对较大，励磁电流  $I_m$  很小， $I_m$  在  $Z_1$  上引起的电压降也不大，所

以可将励磁支路前移组成如图 2-2b 所示的  $\Gamma$  形等效电路，励磁支路以阻抗形式表示。

若将励磁支路的阻抗换成以导纳形式表示，则如图 2-2c 所示。图 2-2c 中阻抗支路的阻抗为  $Z_T = R_T + jX_T$ ，励磁支路的导纳为：

$$Y_T = \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{R_m + jX_m} = \frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2} - j \frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2} = G_T - jB_T$$





(c)  $\Gamma$ 形等效电路

图 2-2 双绕组变压器等效电路

## (二) 变压器的四个参数

### 1. 电阻 $R_T$

$$R_T = \frac{P_k}{1000} \sqrt{\frac{U_N^2}{S_N^2}}$$

式中:  $R_T$  --- 变压器高低压绕组的总电阻( $\Omega$ );  $P_k$  --- 变压器的短路损耗(kW);

$S_N$  --- 变压器的额定容量(MVA);  $U_N$  --- 变压器的额定电压(kV)。

### 2. 电抗 $X_T$

变压器电抗  $X_T$  反映经过归算后一、二次绕组的漏抗之和。

$$X_T = \frac{U_k \%}{100} \sqrt{\frac{U_N^2}{S_N}}$$

式中:  $X_T$  --- 变压器高低压绕组的总电抗( $\Omega$ );  $U_k \%$  --- 变压器的短路电压百分值。

### 3. 电导 $G_T$

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2}$$

式中:  $G_T$  --- 变压器的电导(S);  $P_0$  --- 变压器的空载损耗(kW)。

### 4. 电纳 $B_T$

$$B_T = \frac{I_0 \%}{100} \sqrt{\frac{S_N}{U_N^2}}$$

式中:  $B_T$  --- 变压器的电纳(S);  $I_0 \%$  --- 变压器的空载电流百分值。

#### 5. 各参数的物理意义

$R_T$ : 反映变压器的铜耗(负载损耗);

$X_T$ : 反映变压器的漏磁损耗;

$G_T$ : 反映变压器的铁耗(空载损耗);

$B_T$ : 反映变压器的励磁损耗。

#### 【例题实战】

1. 变压器等值电路中, 电抗  $X_T$  物理意义表征的是 ( )。

- |       |        |
|-------|--------|
| A. 铁损 | B. 主磁通 |
| C. 铜损 | D. 漏磁通 |

2. 将一台双绕组升压变压器作降压变压器使用, 假设高压侧实际运行电压不变, 其低压侧的实际电压与使用降压变压器相比 ( )。

- |       |         |
|-------|---------|
| A. 升高 | B. 降低   |
| C. 不变 | D. 无法判断 |

3. 双绕组变压器的分接头一般装在变压器的 ( )。

- |        |        |
|--------|--------|
| A. 高压侧 | B. 低压侧 |
| C. 两侧  | D. 任意侧 |

4. 双绕组变压器, 将励磁支路前移所得等值电路中, 其导纳为 ( )。

$$A. G_T + jB_T$$

$$B. -G_T - jB_T$$

$$C. G_T - jB_T$$

$$D. -G_T + jB_T$$

5. 某双绕组变压器的额定容量为20000kVA，短路损耗为 $\Delta P_s = 130kW$ ，额定变比为220/11kV，则归算到高压侧等值电阻为（ ）。

$$A. \frac{130 \times 220^2}{20000^2} \times 10^3$$

$$B. \frac{130 \times 220^2}{20000} \times 10^3$$

$$C. \frac{130 \times 220}{20000^2}$$

$$D. \frac{130 \times 11^2}{20000^2} \times 10^3$$

6. 大容量变压器的阻抗中以电抗为主（ ）。

A. 正确

B. 错误

### 【答案解析】

1. 【答案】D。解析：电抗反映的是经过归算后一、二次绕组的漏抗之和。

2. 【答案】B。解析：将升压变压器反过来用作降压，理论上的低压侧输出电压=原二次侧额定电压/原一次侧额定电压=倍率×现负载电压，实际上输出电压比理论值还要低，因为原升压绕组为保障漏感和铜阻带来的影响误差，绕组一般多绕约5%匝数。

3. 【答案】A。解析：考察双绕组变压器分接头。

4. 【答案】C。变压器励磁支路电纳呈电感性，故参数为 $G_T - jB_T$ 。

5. 【答案】A。解析： $R_T = \frac{P_k}{1000} \text{根} \frac{U_N^2}{S_N^2}$  式中： $R_T$ ---变压器高低压绕组的总电阻( $\Omega$ )；

$P_k$ ---变压器的短路损耗(kW)； $S_N$ ---变压器的额定容量(MVA)； $U_N$ ---变压器的额定电

压(kV)，则

$$R_T = \frac{P_k}{1000} \text{根} \frac{U_N^2}{S_N^2} = \frac{130 \text{根} 220^2 \text{根} 1000^2}{1000 \text{根} 20000^2} = \frac{130 \text{根} 220^2 \text{根} 10^3}{20000^2}$$

6. 【答案】A。解析：大型变压器的电抗远大于电阻，阻抗以电抗为主。

## 核心知识点 3 变量、节点的分类

### (一) 基本变量

每个节点有 4 个变量，包括节点注入有功、无功功率及节点的电压值和相位角。如节点  $i$  的变量为  $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $U_i$ 、 $\delta_i$ 。因此，对于有  $n$  个独立节点的网络，其潮流方程有  $2n$  个，变量数为  $4n$  个。

节点  $i$  的变量  $P_i$ 、 $Q_i$  包括了电源的有功、无功功率以及负荷的有功、无功功率，因此也可以说每个节点  $i$  有 6 个变量： $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ 、 $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$ 、 $U_i$ 、 $\delta_i$  等。

(1) 不可控变量：负荷消耗的有功、无功 ( $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$ ) 取决于用户，是无法控制，故称为不可控变量或扰动变量。

(2) 可控变量：发电机发出的有功、无功功率 ( $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ ) 是可以控制的，故称为可控变量。

(3) 状态变量：母线及节点的电压大小和相角 ( $U_i$ 、 $\delta_i$ ) 是受控制变量控制的因变量，其中  $U_i$  主要受  $Q_{Gi}$  的控制， $\delta_i$  主要受  $P_{Gi}$  的控制，也称为系统的状态变量。

### (二) 节点的分类

一般每个节点的 4 个变量中总有两个是已知的，两个是未知的。按每个节点所已知变量的不同，可以将节点分为以下三种类型：

(1) PQ 节点：已知节点注入有功功率和无功功率，待求的未知量是节点的电压幅值和相角。属于这一类节点的有按给定有功、无功功率发电的发电厂母线和未接发电设备的变电所母线。这类节点在电力系统中占大部分。

(2) PV 节点：已知节点的注入有功功率和电压幅值，待求的未知量是节点的注入无功功率和电压相角。这类节点一般为有一定无功功率储备的发电厂母线和有一定无功功率电源的变电所母线。这类节点在电力系统中为数不多，甚至可有可无。

(3) 平衡节点：已知节点电压幅值和相角，待求的未知量是该节点注入的有功和无功功率。潮流计算时，一般只设一个平衡节点，全网的功率由平衡节点作为平衡机来平衡。平衡节点一般选在担负调整系统频率任务的发电厂母线。

设置平衡节点的目的是：

(1) 电压计算需要参考节点；

(2) 在结果未出来之前，网损是未知的，至少需要一个节点的功率不能给定，用来平衡全网功率。

### 【例题实战】

1.  $n$  个节点的电力系统，PQ 节点的数目为  $m$ ，平衡节点的数目为 ( )。

A.  $n-m-1$

B.  $n-m-2$

C. 1

D. 可能为 0

2. 没有其他电源的变电所母线可以看做 ( )。

A. PQ 节点

B. PV 节点

C. QV 节点

D. 平衡节点

3. 当 PV 节点无功功率越限时，PV 节点应转化为 ( )。

A. PQ 节点

B. 平衡节点

C. QV 节点

D. 以上都有可能



4. 以下对平衡节点的描述, 不正确的是 ( )

- A. 又称缓冲节点                      B. 是电压幅值、相位给定的节点
- C. 其有功、无功注入是完全没有限制的      D. 一般选无调节能力的发电节点
5. 节点电压幅值和角度称为 ( )。
- A. 扰动变量                      B. 控制变量
- C. 状态变量                      D. 电源变量

### 【例题实战】

1. 【答案】C。解析：潮流计算中，有且只有一个平衡节点。
2. 【答案】A。解析：通常可以将给定有功、无功功率发电的发电厂母线和没有电源的变电所母线看作PQ节点。
3. 【答案】A。解析：通常可以将给定有功、无功功率发电的发电厂母线和没有电源的变电所母线看作PQ节点。
4. 【答案】D。解析：平衡节点的电压幅值和相位是给定的，而其注入有功功率和无功功率是待求量，一般选取系统中的主调频发电厂为平衡节点比较合理。
5. 【答案】C。状态变量：母线及节点的电压大小和相角 (、) 是受控制变量控制的因变量，其中主要受的控制，主要受的控制，称为系统的状态变量。

## 核心知识点 4 有功功率负荷的变动及其调整

### （一）三种负荷变动

对系统实际负荷变化曲线的分析表明，系统负荷可以看作是由三种具有不同变化规律的变动负荷所组成：

第一种：变动幅度很小，周期又很短，这是由于难以预料的小负荷经常性变化引起的；

第二种：变动幅度较大，周期也较长，这是由于一些冲击性、间歇性负荷的变动引起的，如工业中的大电机、电炉、压延机、电气机车等的开停；

第三种：变动幅度最大，变化缓慢，周期也最长，这是由于人们的生产、生活及气象条件等变化引起的，这种负荷变动是可以预计的。

### （二）三种频率调整措施

一次调频：由发电机的调速器进行，对第一种负荷变动引起的频率偏移进行调整；是一种事后、自动的有差调节。

二次调频：由发电机的调频器进行，对第二种负荷变动引起的频率偏移进行调整；是一种事后、自动的无差调节。

三次调频：是指第三种负荷变动引起的频率偏移的调整，将在有功功率平衡的基础上，按照最优化的原则在各发电厂之间进行经济分配。三次调频是一种事前、手动的有差调整。

一次调频是所有运行中的发电机组都可参加的，取决于发电机组是否已满负荷发电，而二次调频只能由作为专门的调频厂的发电厂来承担。

### 【例题实战】

1. 频率的二次调整是由( )。
  - A. 发电机组的调速系统完成的
  - B. 负荷的频率特性来完成的
  - C. 发电机组的调频系统完成的
  - D. 有功功率的经济分配完成的
2. 电力系统中能实现无差调节的调频方式是 ( )。
  - A. 一次调频
  - B. 二次调频
  - C. 都可以
  - D. 都不能
3. 进行有功功率和频率的三次调整时, 依据的是 ( )。
  - A. 有功功率日负荷曲线
  - B. 有功功率月负荷曲线
  - C. 有功功率季负荷曲线
  - D. 有功功率年负荷曲线
4. ( ) 不能维持电网频率不变, 只能缓和电网频率的改变程度, 此时需要利用发电机同步器增减某些机组的负荷, 即平移静态特性曲线, 以恢复电网频率, 称为 ( )。
  - A. 一次调频, 二次调频
  - B. 一次调频, 三次调频
  - C. 二次调频, 一次调频
  - D. 一次调频, 再同步
5. 二次调频限制的是 ( ) 的负荷变动引起的频率偏移。
  - A. 周期较短
  - B. 周期较长

C.幅度较小

D.幅度较大

**【答案解析】**

1. 【答案】C。解析：二次调频是通过发电机组的调频系统完成，可以做到无差调节。

2. 【答案】B。解析：能实现无差调节的只有二次调频，一次调频只能实现有差调节。

3. 【答案】A。解析：频率的三次调整通常是根据预计的日负荷曲线，按照一定的优化分配原则，在各发电厂间、发电机间实现功率的经济分配。

4. 【答案】A。解析：一次调频只能做到有差调节，不能维持电网频率不变，二次调频可平移静态特性曲线，做到无差调节。

5. 【答案】BD。解析：二次调频针对第二种负荷，第二种负荷的变化频率较慢，周期较长，幅度较大，是由于一些冲击性、间歇性负荷的变动引起的，如工业中大电机、电炉、延压机、电气机车等的开停。

## 核心知识点 5 备用容量

### （一）系统备用容量的定义

（1）系统额定容量=系统装机额定容量之和

（2）系统电源容量=系统中可运行机组的可发容量之和

（3）系统备用容量=系统电源容量-发电负荷，即系统电源容量大于发电负荷的部

分

### （二）系统备用容量的分类

系统备用容量按用途可分为：负荷备用、事故备用、检修备用和国民经济备用四种。

（1）负荷备用。为满足系统中短时的负荷波动和一天中计划外的负荷增加而留有的备用容量称为负荷备用。负荷备用容量的大小应根据系统负荷的大小和运行经验，并考虑系统中各类用电的比重确定，一般为系统最大发电负荷 2%-5%。

（2）事故备用。为使电力用户在发电设备发生偶然事故时不受严重影响，能够维持系统正常供电所需的备用容量。事故备用容量的大小与系统容量、发电机电数、单位机组容量、各类发电厂的比重、对供电可靠性的要求等有关。其数值应根据事故概率确定，一般为系统最大负荷的 5%-10%，并且不小于系统中一台最大机组的容量。

（3）检修备用。为保证系统的发电设备进行定期检修时不致影响供电，而在系统中留有的备用容量。所有发电设备运行一段时间以后，都必须进行检修。检修分大修和小修。一般大修是分批分期安排在一年中最小负荷季节进行，小修则利用节假日进

行，以尽量减少因检修停机所需的备用容量。这种备用的大小应根据需求而定，一般为最大发电负荷的4%-5%。

(4) 国民经济备用。考虑到工农业用户的超计划生产，新用户的出现等而设置的备用容量，其值根据国民经济的增长情况而定，一般约为系统最大发电负荷的3%-5%。

以上四种备用中，负荷备用和事故备用是要求在需要的时候立即投入运行的容量。但是一般火电厂的锅炉和汽轮机，从停机状态起动到投入运行带上负荷，这一过程短则1~2小时，长则十余小时，因此将火电厂停机状态的机组来做这两类备用是不行的。水电厂的水轮机组从停机状态起动到投入运行带上负荷，也需要几分钟，同样不能满足这两种备用的要求。故这两种需要立即投入运行的备用容量，必须是处在运行状态的容量，称为旋转备用或热备用。热备用是指运转中的发电机可能发出的最大功率与实际发电功率的差值。

但热备用容量不宜过大，还有一部分发电容量为冷备用。冷备用是指未运转的发电机组可能发出的最大功率，故冷备用可作为检修备用、国民经济备用和一部分事故备用。

### 【例题实战】

1. 运转中的发电设备所留有的备用容量称为（ ）。

- A. 冷备用
- B. 热备用
- C. 检修备用
- D. 国民经济备用

2. 为了能及时向增加的负荷供电而设置的备用应是（ ）。

- A. 事故备用
- B. 检修备用

C.冷备用

D.热备用

3.未运转的发电设备可能发的最大功率( )

A.热备用

B.冷备用

C.负荷备用

D.事故备用

4.关于有功备用容量,下列说法错误的是( )。

A.检修备用应该是冷备用

B.事故备用必须全部是热备用

C.负荷备用应为热备用

D.国民经济备用应为冷备用

5.为减小系统负荷变化所引起的频率波动,应采取的措施是( )。

A.设置足够的热备用容量,并使尽可能多的机组参与一次调频

B.设置足够的冷备用容量,并装设自动按频率减负荷装置

C.设置足够的热备用容量,并使尽可能少的机组参与一次调频

D.设置足够的无功电源

6.在发电设备发生偶然性事故时,维持系统正常供电需要的备用称为( )。

A.负荷备用

B.事故备用

C.检修备用

D.国民经济备用

### 【答案解析】

1.【答案】B。解析:热备用是指随时可以投入运行的设备,运转中的发电机留有的备用容量为热备用。

2.【答案】D。解析:需要立即投入运行的备用容量,必须是处在运行状态的容量,称为热备用或旋转备用。

**3.【答案】B。**解析：冷备用是指未运转的发电机组可能发出的最大功率。热备用是指运转中的发电机可能发出的最大功率与实际发电功率的差值。

**4.【答案】B。**解析：负荷备用应为热备用，事故备用可以有部分冷备用。

**5.【答案】A。**解析：应设置足够的热备用容量，因热备用是处在运行状态的容量，可以立即投入运行。同时应使尽可能多的机组参与一次调频，抑制频率波动。

**6.【答案】A。**解析：应设置足够的热备用容量，因热备用是处在运行状态的容量，可以立即投入运行。同时应使尽可能多的机组参与一次调频，抑制频率波动。



## 核心知识点 6 无功功率电源

### (一) 概念及分类

1. 定义：电力系统中，凡是可以发出（感性）无功功率的设备或装置，都可以称为无功功率电源。

#### 2. 主要无功功率电源的类型

传统无功电源：同步发电机、调相机、并联电容器、并联电抗器；

新型无功电源：静止无功补偿器、静止调相机。

### (二) 各种无功电源性质

#### (1) 同步发电机

发电机既是唯一的有功功率电源，同时也是最基本的无功功率电源。通过调节励磁，可以双向、连续调节无功出力，无功出力范围受运行极限约束；无需附加投资，优先考虑。

发电机的额定功率通常是指额定的有功功率 $P_{GN}$ ，如200MW 机组。发电机在额定状态下的视在功率 $S_{GN}$ 及无功功率 $Q_{GN}$ 可表示为：

$$S_{GN} = \frac{P_{GN}}{\cos Q_N} = P_{GN} \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_N}$$
$$Q_{GN} = P_{GN} Q_N = S_{GN} \sin Q_N$$

式中， $P_{GN}$ 和 $Q_N$ 分别为额定有功功率和额定功率因数角。

发电机运行时，总要受到一定条件，如定子绕组温升、励磁绕组温升以及原动机功率等的约束。这些约束条件决定了发电机发出的有功、无功功率有一定的限额。下面就以隐极机为例通过做图的方法确定发电机的运行极限图。设发电机接在电压为

$U_N$  的恒压母线上，其等值电路及额定运行时的相量图分别为图 5.3(a)(b)所示，相量 AB 的长度为定子绕组电压降  $X_d I_N$ ，它正比于定子额定电流，也可以说，以一定的比例代表发电机的额定视在功率  $S_{GN}$ ，它在纵轴上的投影 AC 就以相同的比例代表发电机额定有功功率  $P_{GN}$ ，在横轴上的投影 AD 则代表额定无功功率  $Q_{GN}$ 。向量 OB 的长度为空载电动势  $E_q$ ，它正比于发电机的额定励磁电流  $I_{GN}$ 。

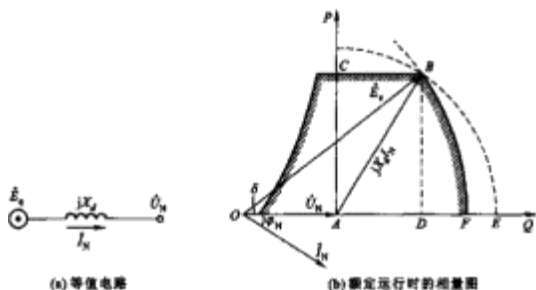


图 6-1 发电机的运行极限图

受定子电流额定值（额定视在功率）的限制，发电机应运行在以 A 为圆心，以 AB 为半径的圆弧 BE 上；受转子电流额定值（空载电动势）的限制，发电机应运行在以 O 为圆心，以 OB 为半径的圆弧 BF 上；受原动机功率（额定有功功率）的限制，发电机应运行在水平线 CB 上。综上可得发电机正常运行时的运行极限图，即图中标斜线的部分。

由图可见，发电机只有运行在额定状态（即额定电压、电流和功率因数）下的 B 点，其功率可得到充分的利用。当系统中有功率备用充足时，可使靠近负荷中心的发电机降低有功功率，多增加无功功率输出，以提高系统运行的电压水平。需要说明

的是，发电机正常运行时以滞后功率因数运行，但必要时也可以在超前功率因数下运行，即进相运行，以吸收系统中多余的无功功率。进相运行时主要受静态稳定的约束，图中第二象限画出了其运行范围。

## (2) 同步调相机

调相机实际上就是只能发无功功率的同步发电机。它在过励运行时向电力系统供给感性无功功率，欠励运行时从电力系统吸取感性无功功率。所以改变同步调相机的励磁，可以平滑地改变它的无功功率大小及方向，因而它可以平滑地调节所在地区的电压。但在欠励运行时，其容量约为过励运行时容量的50%-60%。

调相机可以装设自动调节励磁装置，能自动地在电力系统电压降低时增加输出的无功功率以维持系统的电压。特别是有强行励磁装置时，在系统故障情况下，也能调整系统的电压，这对提高系统的稳定性是有利的。但是调相机是旋转机械，运行维护比较复杂。它的有功功率损耗较大，在满载时损失约为额定容量的1.5%-5%，容量越小，百分值越大。小容量的调相机每千伏安容量的投资费用也较大，故调相机宜于大容量集中使用，容量小于5MVA的一般不装设。在我国调相机常安装在枢纽变电所；在国外，现已很少采用调相机，而改用静止补偿器。

总之，同步调相机通过调节励磁，可以双向、连续调节无功出力（欠励运行容量约为过励运行容量50%）；电压调节特性好；投资大，运行维护困难，趋于淘汰。

## (3) 并联电容器

应用最广泛的一种无功电源，只能向系统供给感性无功功率，而不能吸收无功功率（单向调节）。它供给的无功功率与所在节点的电压的平方成正比，即 $Q = U^2 / X_C$ 。

当节点电压下降时，它供给系统的无功功率也将减小，导致系统电压水平进一步下降；成组投退，不能连续调节；投资较小，运行灵活，安装维护方便。

#### (4) 并联电抗器

一种广义无功电源，只能吸收感性无功（单向调节），作用是用于吸收高压远距离输电线路轻载或空载运行时的过剩无功。

#### (5) 静止无功补偿器

静止补偿器的全称为静止无功补偿器(SVC)，有各种不同型式。目前常用的有晶闸管控制电抗器型(TCR 型)、晶闸管开关电容器型(TSC 型)和饱和电抗器型(SR 型)。

静止无功补偿器由电力电容器与电抗器并联组成，电容器可发出无功功率，电抗器可吸收无功功率，两者结合起来，再配以适当的调节装置，就可以按负荷变化调节输出无功功率的大小和方向，具有较好的调节性能。电压变化时，静止补偿器能快速地、平滑地调节无功功率，以满足动态无功补偿的需要。因它由静止元件组成，运行维护方便，并且有功损耗较小(低于1%)。因此，静止补偿器在国外已被大量使用，在我国电力系统中也将得到日益广泛的应用。

### 【例题实战】

1.既能充当有功功率的电源，又是最基本的无功功率电源的是（ ）。

- A.调相机
- B.电容器
- C.发电机
- D.电抗器

2.电压越高，并联电容器出力（ ）。

- A.越大
- B.越小

C.不变 D.其他三个选项都不是

3.超高压线路的充电功率（ ）作为电网正常的无功补偿容量使用。

A.可以 B.不可以

C.不确定是否可以 D.其他三个选项都不是

4.（多选）无功功率电源包括（ ）。

A.发电机 B.电容器和调相机

C.静止补偿器和静止调相机 D.并联电抗器

5.（多选）并联补偿可分为（ ）。

A.并联电容器 B.并联电动机

C.并联静止补偿器 D.并联调相机

6.（多选）电力系统中无功功率源包括（ ）。

A.发电机 B.调相机

C.静止补偿器 D.电抗器

#### 【答案解析】

1.【答案】C。解析：发电机可以发出有功功率，也可以通过调节励磁发出无功，是最基本的无功功率电源。

2.【答案】A。解析：并联电容器出力与电压平方成正比，电压越高，电容器出力越大。

3.【答案】B。解析：超高压线路的充电功率不能根据系统运行方式控制投切，不能作为电网正常的无功补偿容量使用。

4. 【答案】ABCD。解析：电力系统的无功电源向系统发出滞后的无功功率，一般系统中有下列几类无功电源，一是同步发电机以及过励运行的同步电动机；二是无功补偿电源包括电容器、静止无功补偿等。

5. 【答案】ACD。解析：并联补偿可采用同期调相机、电容器和静止补偿器等无功补偿设备进行补偿。

6. 【答案】ABC。解析：电抗器用来吸收无功功率，不是无功功率源。ABC 均可发出无功功率，为无功源。

## 核心知识点 7 中枢点调压

### （一）中枢点定义

电压中枢点是指某些可以反映系统电压水平的主要发电厂或枢纽变电所母线。因为很多负荷都由这些中枢点供电。如能控制住这些点的电压偏移，也就控制住了系统中大部分负荷的电压偏移。于是，电力系统电压调整问题也就转变为保证各中枢点的电压偏移不超出给定范围的问题。

电压中枢点一般选择在：（1）区域性水、火电厂的高压母线；（2）枢纽变电所二次母线；（3）有大量地方负荷的发电厂母线；（4）城市直降变电所的二次母线。

### （二）中枢点调压方式

根据负荷性质、供电范围确定电压中枢点的调压方式，主要有逆调压、顺调压和常调压三种。

#### 1. 逆调压

如中枢点供电至各负荷的电力线路较长，各负荷的变化规律大致相同，且各负荷的变动较大（即最大负荷与最小负荷的差值较大），则在最大负荷时，要提高中枢点的电压以抵偿电力线路上因最大负荷增大而增大的电压损耗，在最小负荷时要将中枢点电压降低一些以防止负荷点的电压过高。这种最大负荷时升高电压，最小负荷时降低电压的中枢点电压调整方式称为“逆调压”。逆调压时，要求最大负荷时将中枢点电压升高至  $105\% U_N$ ，最小负荷时下降为  $U_N$ ，其中  $U_N$  为电力线路额定电压。

适用于供电线路较长、负荷变动大但变化规律大体相同的电压中枢点。

## 2.顺调压

若负荷变动甚小，电力线路电压损耗也小，或用户为允许电压偏移较大的农业电网，可采用“顺调压”方式，即在最大负荷时允许中枢点电压低一些，但不得低于电力线路额定电压的102.5%，最小负荷时允许中枢点电压高一些，但不得高于电力线路额定电压的107.5%。

适用于供电线路短、负荷变动不大的电压中枢点。

## 3.常调压

若负荷变动较小，电力线路上电压损耗也较小，则采用介于上述两种调压要求之间的调压方式——常调压（恒调压），即在任何负荷下，中枢点电压保持在一个基本不变的数值，一般比电力线路额定电压高2%-5%。

以上所述的都是电力系统正常运行时的调压要求。当系统发生事故时，因电压损耗比正常时大，对电压质量的要求降低一点。通常事故时的电压偏移运行较正常时再增大5%。

### 【例题实战】

1.逆调压中枢点的电压为（ ）。

- A.高峰时 $1.05U_N$ ，低谷时 $U_N$
- B.高峰时 $1.075U_N$ ，低谷时 $1.025U_N$
- C.高峰时不低于 $1.025U_N$ ，低谷时不高于 $1.075U_N$
- D.任何情况下，电压都在 $1.02—1.05U_N$

2.高峰负荷时将中枢点电压升高，低谷负荷时将其下降的调压方式是（ ）。



### A. 顺调压

### B.逆调压

C.常调压

D.无法确定

3. 中枢纽调压方式中逆调压可以在最大负荷时提高中枢纽点的电压, 但一般最高不能超过 ( ),

A. 110%  $U_N$

B. 105%U<sub>N</sub> $C, U_N$ D.95%  $U_N$ 

4.对于供电范围小, 所供用户性质相近且负荷波动小的降压变电站低压母线应采用 ( ) 调压方式。

### A. 顺调压

### B.恒调压

### C. 逆调压

#### D. 當調壓

5.逆调压方式是一种要求最高的调压方式,一般需要专门的调压装置。( )

A.正确

B. 错误

**【答案解析】**

1. 【答案】A。解析：逆调压是指在最大负荷时，提高系统电压中枢点电压至 105% 倍标准电压以补偿线路上增加的电压损失，最小负荷时降低中枢点电压至标准电压以防止受端电压过高的电压调整方式。

2. 【答案】B。解析：逆调压是指在最大负荷时，提高系统电压中枢点电压至105%额定电压以补偿线路上增加的电压损失，最小负荷时降低中枢点电压至标准电压以防止受端电压过高的电压调整方式。

3. 【答案】B。解析：逆调压是指高峰负荷时升高中枢点电压，低谷负荷时降低中枢点电压，高峰时可升到 1.05UN。

4.【答案】A。解析：若负荷变动甚小，电力线路电压损耗也小，或用户为允许电压偏移较大的农业电网，可采用“顺调压”方式，即在最大负荷时允许中枢点电压低一些，但不得低于电力线路额定电压的 102.5%，最小负荷时允许中枢点电压高一些，但不得高于电力线路额定电压的 107.5%。

5.【答案】A。解析：逆调压是指在电压允许偏差范围内，电网供电电压的调整使电网高峰负荷时的电压高于低谷负荷时的电压值，使用户的电压高峰、低谷相对稳定，是要求最高的调压方式。

## 核心知识点 8 对称分量法

### (一) 对称分量法

对称分量法是将一组三相不对称的电压或电流相量分解为三组分别对称的相量，分别称为正序分量、负序分量和零序分量，再利用线性电路的叠加原理，对这三组对称分量分别按对称的三相电路进行求解，然后再将其结果进行叠加。已知某一相电压或电流的各序分量，可以求得其他两相的电压或电流。

a、b、c 三相电压或电流的序分量如图 7-1 所示。

正序分量：大小相等，相位：a 相超前 b 相  $120^\circ$ ，b 相超前 c 相  $120^\circ$ 。

负序分量：大小相等，相位：a 相超前 c 相  $120^\circ$ ，c 相超前 b 相  $120^\circ$ 。

零序分量：大小相等，相位相同。

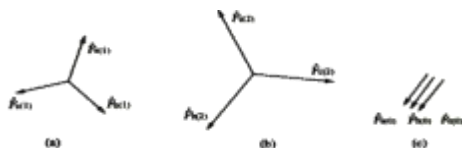


图 7-1 三相分量的正负零序分量

若已知 a 相的各序分量，则 a、b、c 三相电压或电流与 a 相正负零序分量的关系

为：

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{a2} \\ U_{a0} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix}$$

式中,  $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $1 + a + a^2 = 0, a^3 = 1$ 。

其逆关系为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

## (二) 电力系统不对称分量的特点

(1) 不对称短路时, 电源电压仍保持对称, 除短路点外电路其他部分的参数三相相同, 但由于短路点三相参数不对称, 所以短路后, 三相电流、电压的基频交流分量不再保持对称, 根据对称分量法, 我们可以把它们分解为正序、负序、零序三相分量。

(2) 只有三相电流之和不等于零时, 才存在零序电流。在三角形接线或没有中性线的星形接线系统中, 即使三相电流不对称, 也总有三相电流之和为零, 所以不存在零序分量电流。只有在有中性线的星形接法中才可能出现零序电流, 且中性线中的电流为  $\dot{I}_n = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{c0} = 3\dot{I}_{a0}$ , 即为 3 倍的零序电流。因此, 零序电流必须以中性线作为通路。

(3) 三相系统的线电压之和为 0, 因此三个不对称的线电压分解成对称分量时, 其中总不会有零序分量。

## (三) 对称分量法在不对称故障分析中的应用

(1) 电力系统中各序分量是相互独立、互无影响的, 即正序电压只产生正序电流、负序电压只产生负序电流、零序电压只产生零序电流, 反之亦然。

(2) 序阻抗：电力系统三相对称元件的序阻抗等于其端口所加的序电压和流过元件的该序电流的比值。对于静止元件，如线路、变压器等，正序和负序阻抗是相等的；对于旋转的电机，正序和负序阻抗不相等。

(3) 对称分量法分析不对称故障的原理：由于电力系统中三序分量的独立性，因此分析电力系统不对称故障时，可以利用叠加原理，将三相不对称电路分解为三个三相对称电路，分析计算三序分量，然后将三序分量叠加得到三相不对称电压和电流。

#### 4. 对称分量法分析电力系统不对称故障的基本思路

- (1) 将电流、电压分解为三序对称分量；
- (2) 绘制三序等值电路，写出基本相的三序电压平衡方程；
- (3) 根据故障处边界条件补充三个基本相序分量的电流、电压表示的边界条件方程；
- (4) 对2，3所列出的方程组进行求解，求出基本相的各序电流、电压分量（解析法）；或根据边界条件将三序网络进行连接，得到复合序网，利用复合序网求基本相的各序电流、电压（复合序网法）。
- (5) 利用对称分量法公式，求故障处的各相电流、电压。

#### 【例题实战】

1. 关于对称分量法描述正确的是( )。
- A. 适合于一点故障不适合两点故障
- B. 只适合于一点故障
- C. 对于一点故障和两点故障都适应

D.线性和非线性都适应

2.系统发生两相短路时，短路点正序电压与负序电压的关系为（ ）。

A.  $U_{k1} + U_{k2} = 0$

B.  $U_{k1} = U_{k2}$

C.  $U_{k1} > U_{k2}$

D.  $U_{k1} < U_{k2}$

3.如A相电流为 $3\angle 0^\circ$  A，B相电流为 $3\angle 0^\circ$  A，C相电流为 $3\angle 0^\circ$  A，则A相中的零序分量（ ）。

A.  $0\angle 0^\circ$

B.  $3\angle 0^\circ$

C.  $6\angle 0^\circ$

D.  $9\angle 0^\circ$

4.用对称分量法分析电力系统不对称短路的基础是（ ）。

A. 电力系统各序分量具有独立性

B. 电力系统三序分量均为对称

C. 电力系统各元件的正序阻抗等于负序阻抗

D. 发电机不存在负序和零序电动势

5.根据对称分量法，各相电流的正序分量与其零序分量的相位关系为（ ）。

A. 超前  $120^\circ$

B. 滞后  $120^\circ$

C. 同相位

D. 尚难确定

6.关于零序电压，下面说法正确的是（ ）。

A. 任何情况下，线电压中都不会存在零序分量

B. 正常运行和相间短路时，线电压中不存在零序分量，接地短路时线电压中存在零序分量

C. 任何短路情况下，线电压中都可能存在零序分量

D. 以上都不对

### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析：对称分量法只适用于线性系统，对于一点故障和两点故障都适应。

$$I_{f0} = 0 \quad \text{)]}$$

2. 【答案】B。解析：电力系统发生b、c 两相短路，则边界条件方程为：
$$\begin{aligned} U_b &= -U_c \\ U_{fb} &= U_{fc} \end{aligned}$$

$$I_{f0} = 0 \quad \text{)]}$$

求解可得到对称分量为：
$$\begin{aligned} I_{f(1)} &= -I_{f(2)} \\ U_{f(1)} &= U_{f(2)} \end{aligned}$$
，即短路点正序电压与负序电压相等。

3. 【答案】B。解析：将ABC 三相电流分别作对称分量法分解可得以下方程组：

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A(1)} + \dot{I}_{A(2)} + \dot{I}_{A(0)} = 3 \text{经} 0 \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B(1)} + \dot{I}_{B(2)} + \dot{I}_{B(0)} = a^2 \dot{I}_{A(1)} + a \dot{I}_{A(2)} + \dot{I}_{A(0)} = 3 \text{经} 0 \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C(1)} + \dot{I}_{C(2)} + \dot{I}_{C(0)} = a \dot{I}_{A(1)} + a^2 \dot{I}_{A(2)} + \dot{I}_{A(0)} = 3 \text{经} 0 \text{ A}$$

联立以上三个方程组可解得 $\dot{I}_{A(0)} = 3 \text{经} 0$ ，故正确答案应选B。

4. 【答案】A。解析：根据对称分量法的定义，将一组不对称的相量分解为三组对称相量进行分析计算，其特征是线性对称、各相量具有独立性，其分析方法的基础在于各个相量之间的彼此独立性。

5.【答案】D。解析：根据对称分量法的特征可知，三序相量参数对称且各自具有独立性，故不能确定正序分量与其他相量之间的关系，即正序和零序相量之间的关系式不能确定的。

6.【答案】A。解析：线电压是指三相线路中两个端点之间的电压，而零序分量通过大地构成通路，不通过三相的两个端点之间，故线电压中不存在零序分量，且相电压中可以存在零序分量，故不管发生任何不对称短路的情况，线电压中不会出现零序分量。



## 核心知识点 9 不对称故障分析

### (一) 单相接地短路(a 相为例)

#### 1. 短路点处的边界条件

(1) 边界条件:  $\dot{I}_b = 0, \dot{I}_c = 0, \dot{U}_{fa} = 0$ 。

(2) 序网边界条件:  $\dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{f0}, \dot{U}_{f1} + \dot{U}_{f2} + \dot{U}_{f0} = 0$ 。

#### 2. 复合序网图(串联型)

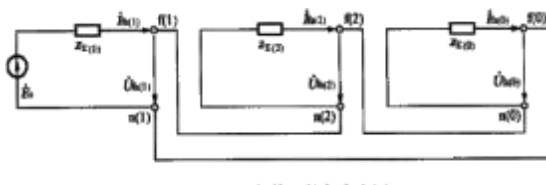


图 9-1 单相接地短路的复合序网图

#### 3. 短路点电流、电压的各序分量

$$\text{短路点处各序电流 } \dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{f0} = \frac{\dot{U}_{f(1)}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}}$$

#### 4. 短路点故障相电流及非故障相电压

(1) 短路点处故障相的短路电流为:

$$\dot{I}_{fa} = \dot{I}_{f1} + \dot{I}_{f2} + \dot{I}_{f0} = \frac{3\dot{U}_{f(1)}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}}$$

一般 $Z_{\Sigma(1)}$ 和 $Z_{\Sigma(2)}$ 接近相等。因此，如果 $Z_{\Sigma(0)}$ 小于 $Z_{\Sigma(1)}$ ，则单相接地短路电流大于同一地点的三相短路电流（ $\dot{U}_{f0}/Z_{\Sigma(1)}$ ）；反之，则单相接地短路电流小于三相短路电流。

## (二) 两相短路(b、c 两相短路为例)

f 点发生两相（b、c 相）短路，如图 7-23 所示。

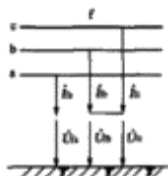


图 9-2 两相短路故障点电流、电压

### 1. 短路点处的边界条件

$$(1) \text{ 相边界条件: } \dot{I}_{fa} = 0, \dot{I}_{fb} = -\dot{I}_{fc}, \dot{U}_{fb} = \dot{U}_{fc};$$

$$(2) \text{ 序边界条件: } \dot{I}_{f0} = 0, \dot{I}_{f1} = -\dot{I}_{f2}, \dot{U}_{f1} = \dot{U}_{f2}.$$

由边界条件可知，两相短路故障点没有零序电流，因为故障点不与地相连，零序电流没有通路。因此，两相短路时没有零序分量。

## 2. 复合序网(正负序并联, 零序开路)

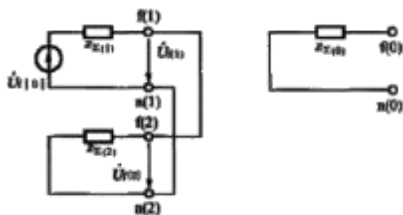


图 9-3 两相短路的复合序网图

## 3. 短路点电流和电压的各序分量

短路点处各序电流

$$I_{f1} = -I_{f2} = \frac{-\dot{U}_{f10}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}}$$

短路点处各序电压通过复合序网或者三序电压平衡公式即可求出。

## 4. 故障相短路电流

$$I_{fb} = a^2 I_{f1} + a I_{f2} = (a^2 - a) \frac{\dot{U}_{f10}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}} = -j\sqrt{3} \frac{\dot{U}_{f10}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}}$$

$$I_{fc} = -I_{fb} = j\sqrt{3} \frac{\dot{U}_{f10}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}}$$

因此, 当  $Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma 2}$  时, 两相短路电流是三相短路电流的  $\sqrt{3}/2$  倍。所以, 一般讲, 电力系统两相短路电流小于三相短路电流。

由复合序网可知, 当  $Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma 2}$ , 则:

$$\dot{U}_{f1} = \dot{U}_{f2} = \frac{1}{2} \dot{U}_{fa0}$$

—

$$\dot{U}_{fa} = \dot{U}_{f1} + \dot{U}_{f2} = \dot{U}_{fa0}$$

$$\dot{U}_{fb} = \dot{U}_{fc} = (a^2 + a) \dot{U}_{f1} = -\frac{1}{2} \dot{U}_{fa0}$$

—

即非故障相电压等于故障前电压，故障相电压幅值降为一半。

### (三) 两相短路接地(b、c 两相短路接地为例)

f 点发生两相 (b、c 相) 短路接地，如图 7-26 所示。

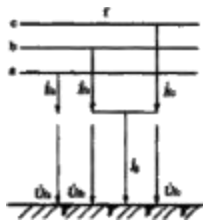


图 9-4 两相短路接地

#### 1. 短路点处的边界条件

$$(1) \text{ 相边界条件: } \dot{I}_{fa} = 0, \dot{U}_{fb} = \dot{U}_{fc} = 0;$$

$$(2) \text{ 序边界条件: } \dot{I}_{f1} + \dot{I}_{f2} + \dot{I}_{f0} = 0, \dot{U}_{f1} = \dot{U}_{f2} = \dot{U}_{f0}.$$

## 2. 复合序网(正负零序并联)

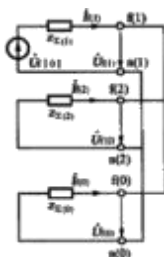


图 9-5 两相短路接地复合序网

## 3. 短路点电流和电压的各序分量

短路点处各序电流

$$\dot{I}_{f1} = \frac{\dot{U}_{f(1)}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} // Z_{\Sigma 0}} \quad \dot{I}_{f2} = -\frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} \dot{I}_{f1} \quad \dot{I}_{f0} = -\frac{Z_{\Sigma 2}}{Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} \dot{I}_{f1}$$

$$\text{短路点处各序电压 } \dot{U}_{f1} = \dot{U}_{f2} = \dot{U}_{f0} = \dot{I}_{f1} (Z_{\Sigma 2} // Z_{\Sigma 0})$$

### 【例题实战】

1. 对于单相短路其序网络的连接是 ( )。

- A. 正序和负序并联                      B. 正序负序零序串联  
C. 正序负序零序并联                  D. 负序正序并联再和零序串联

2. 短路电流中一定存在零序分量的短路类型是 ( )。

- A. 接地短路                              B. 相间短路  
C. 不对称短路                          D. 三相短路

3.关于不对称短路，下述说法中错误的是（ ）。

A.对称分量法仅适用于线性系统

B.任何不对称短路情况下，短路电流中都存在负序分量

C.相间短路情况下，短路电流中不存在零序分量

D.同短路电流中的非周期分量一样，不对称短路时短路电流中的负序分量和零序分量都将逐渐衰减到零

4.单相（A相）短路的故障特点是（ ）。

$$A. \left. \begin{aligned} U_{fa} &= 0 \\ I_{fb} &= I_{fc} = 0 \end{aligned} \right\}$$

$$B. I_{fb} = -I_{fc}$$

$$C. U_{fb} = U_{fc} = 0$$

D.短路点的正序电压等于零

5.对于单相短路的不对称短路短路电流和正序电流的关系是（ ）。

A.1.732 倍

B.3

C.2

$$D. \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{\Sigma 0} X_{\Sigma 2}}{(X_{\Sigma 0} + X_{\Sigma 2})^2}} \quad \sqrt{\quad}$$

6.电力系统同一点发生不同类型短路故障时，按照故障处正序电压从高到低的短路类型排列顺序错误的是（ ）

A.三相短路、两相短路、两相接地短路、单相接地短路

B.单相接地短路、两相短路、两相接地短路、三相短路

C.两相接地短路、两相短路、单相接地短路、三相短路

D.两相短路、两相接地短路、单相接地短路、三相短路

### 【答案解析】

1. 【答案】B。解析：单相接地短路的正负零序网都是串联的。

2. 【答案】A。解析：存在零序分量必须必须有零序电流流通的通路，即接地故障。

3. 【答案】D。解析：不对称短路时短路电流中的负序分量和零序分量都将逐渐过渡到稳态值，不为零。

4. 【答案】A。解析：单相接地短路故障处A相电压为零，故障处BC两相电压相等，非故障相BC相电压相等且不为零。

$$5. 【答案】B。解析：由序网关系可知， $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{U_{k(0)}}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0}}。$$$

$$\text{故短路电流 } I_{k1} = I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = I_{a1}$$

6. 【答案】ACD。解析：三相短路故障处正序电压为零。其他故障处正序电压

$$U_{a1} = U_{ka(0)} - Z_{S1} I_{a1}，\text{因一般情况下短路电流 } I_{fa1}^{(11)} > I_{fa1}^{(2)} > I_{fa1}^{(1)}，\text{故障处正序电压}$$

$$U_{fa1}^{(1)} > U_{fa1}^{(2)} > U_{fa1}^{(11)} > U_{fa1}^{(3)}。$$

## 五、电力系统继电保护

### 核心知识点 1 继电保护的基本任务

继电保护装置 (Relay Protection) 指能反应电力系统中电气设备发生故障或不正常运行状态, 并动作于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。电力系统继电保护的基本任务是:

1. 自动、迅速、有选择性地故障元件从电力系统中切除, 使故障元件免于继续遭到损坏, 保护其他无故障部分迅速恢复正常运行;

2. 反应电气设备的不正常运行状态, 并根据运行维护条件, 而动作于发出信号或跳闸。此时一般不要求迅速动作, 而是根据对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时, 以免暂短的运行波动造成不必要的动作和干扰引起的误动。

它的基本任务简单来说就是: 故障时跳闸, 不正常运行时发出信号。

#### 【例题实战】

1. 对继电保护的基本要求是 ( )。
- A. 快速性、选择性、灵敏性、预防性  
B. 安全性、选择性、灵敏性、可靠性  
C. 可靠性、选择性、灵敏性、快速性  
D. 原则性、选择性、灵敏性、可靠性
2. 当电力系统发生故障时, 正确地切断离故障点最近的断路器, 是体现继电保护的 ( )。
- A. 速动性      B. 选择性      C. 可靠性      D. 灵敏性

#### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析: 继电保护的基本要求: 选择性、速动性、灵敏性、可靠性
2. 【答案】B。解析: 选择性是指保护装置动作时, 在尽可能小的区间内将故障从电力系统中断开, 最大限度地保证系统中无故障部分仍能安全运行。切断离故障点最近的断路器, 缩小停电范围, 所以是选择性。



## 核心知识点 2 三段式电流保护

### (一) 无时限电流速断保护 (I 段)

对于反应于短路电流幅值增大而瞬时动作的电流保护，称为电流速断保护。这种保护形式更侧重于速动性。

#### 1. 无时限电流速断保护工作原理

如图 1，假设在每条线路上均装有电流速断保护，希望的理想状态是：A-B 发生故障时保护 2 能瞬时动作，B-C 发生故障时保护 1 能瞬时动作。但是实际情况是无论是图中 d1 点短路还是 d2 点短路，保护 2 上的过短路电流的数值几乎都是一样的，保护 2 都会瞬时动作。

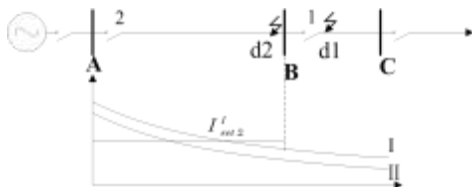


图 1 无时限电流速断动作特性

#### 1. 整定原则

为了解决上述问题，通常用来保证动作的选择性的方法是从保护装置其启动参数的整定上保证下一条线路出口处短路时不启动，即躲开相邻线路出口短路的最大短路电流的方法。

#### 2. 整定计算

$$I_{set,2}^I = K_{rel}^I I_{KB,max}$$

式中， $K_{rel} = 1.2 \sim 1.3$  为可靠系数。

#### 3. 保护范围的校验

保护的範圍隨運行方式、故障類型的变化而变化，最小的保護範圍在系統最小的運行方式下兩相短路時出現，要求大於被保護線路全長的 15%~20%。

#### 4. 电流速断保护的评价

电流速断保护的优点是简单可靠、动作迅速，而获得了广泛的应用；但缺点是不能保护线路的全长，并且保护范围受系统运行方式的影响大。

## (二) 限时电流速断保护 (II 段)

由于有选择性的电流速断保护不能保护本线路的全长，因此增加一段带时限动作的保护，用来切除本线路上速断范围以外的故障，同时也能作为速断保护的后备，这种保护形式被称为限时电流速断保护。

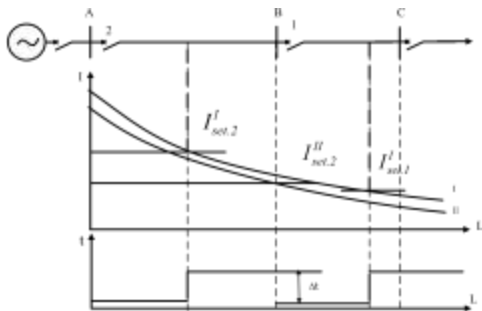


图2 限时电流速断动作特性

### 1. 整定原则

按照躲开前方各相邻元件电流速断保护的动作电流来整定（或者说与相邻线路的电流速断保护相配合）。保护的配合包含两方面的含义，第一个是灵敏度（整定值）的配合，另一个是时间的配合。

### 2. 整定计算

(1) 整定值与相邻线路第 I 段保护配合，在保证保护本段末端的同时，不能超出相邻段的 I 段保护范围。

$$I_{set,2} = K_{rel} I^I_{set,1}$$

式中  $K_{rel}^I = 1.1 \sim 1.2$ 。

(2) 动作时限选择：

$$t_2^{II} = t_1^I + t$$

式中 $\Delta t$  是保护2 的限时电流速断保护在保护1 的无时限电流速断保护基础上的延时。

### 3. 保护范围的校验

为了能够保护本线路的全长，限时电流速断保护必须在系统最小的运行方式下，线路末端发生两相短路时，具有足够的反应能力，这个能力通常用灵敏度系数来衡量。对反应与数值上升而动作的过量保护装置，灵敏系数的计算公式为：

$$K_{sen} = \frac{\text{保护范围内发生金属性短路时故障参数的计算值}}{\text{保护装置的整定值}}$$

限时电流速断保护属于增量保护，为了保证在线路末端短路时，保护装置一定能够动作，要求 $K_{sen}$  之 1.3 ~ 1.5。

### 4. 对限时电流速断保护的评价

线路上装设了电流速断保护和限时电流速断保护以后，它们的联动工作可以保证全线范围内的故障都能在0.3s~0.5s 内予以切除，在一般情况下都能满足速动性的要求，因此，可以作为35kV 及以下要求不是很高的线路的主保护。

## (二) 定时限过电流保护 (Ⅲ段)

为保证在正常情况下各条线路上的过电流保护绝对不动作，显然保护装置的启动电流必须大于该线路上出现的最大负荷电流，同时，还必须考虑在外部故障切除后，负荷自启动电流作用下保护装置必须能够返回。

### 1. 整定原则

过电流保护启动电流要按照躲开最大负荷电流来整定，定时限过电流保护不仅能够保护本线路全长，而且也能保护相邻线路全长，起到后备保护的作用。

### 2. 整定计算

(1) 大于流过该线路的最大负荷电流 $I_{L,max}$ 。

$$I_{set}^{III} = K_{rel}^{III} I_{L,max}$$

式中 $K_{rel}^{III} = 1.15 \sim 1.25$ 。

(2) 外部故障切除后，电动机自启动时，保护能可靠返回。

根据继电器的返回系数求得继电器的动作电流（过电流保护的电流整定值）

$$I_{\text{set}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{re}}}{K_{\text{re}}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{III}} K_{\text{Ms}} I_{\text{L.max}}}{K_{\text{re}}}$$

$K_{\text{rel}}^{\text{III}}$ —可靠系数，一般取 1.15~1.25

$K_{\text{Ms}}$ —电动机自启动系数，数值大于 1，根据网络具体接线和负荷性质确定

$K_{\text{re}}$ —电流继电器的返回系数

电力系统中大多存在电动机载荷，因此，一般按后一种情况整定定时限过电流保护。

### (3) 动作时限特性

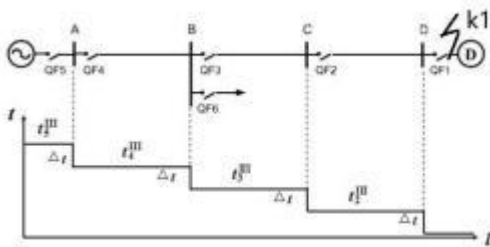


图3 定时限过电流保护时限配合原理图

由图3，动作时限特性是从负载端到电源端逐级升高的阶梯特性，这是为了保证保护动作的选择性，因为整定值上配合不了，只好用时间来配合，很显然这个时间特性曲线并不理想，因为越靠近电源侧的动作时间越长。

## 4. 灵敏性检验

### (1) 作为近后备

采用最小运行方式下本线路末端两相短路时的电流来校验：

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{\text{k.B.min}}}{I_{\text{set.l}}^{\text{III}}} > 1.3 \quad 1.5$$

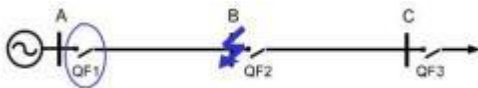


图4 定时限过电流保护作为本线路后备保护示意图

## (2) 作为远后备时

采用最小运行方式下相邻线路末端两相短路时的电流来校验：

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{kC.\min}}{I_{\text{set}}^{\text{III}}} > 1.2$$

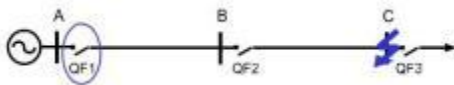


图5 定时限过电流保护作为相邻线路后备保护示意图

## (3) 灵敏性配合

在各个过电流保护之间，要求灵敏系数互相配合；对同一故障点而言，要求越靠近故障点的保护灵敏系数越高。

$$K_{\text{sen.1}} > K_{\text{sen.2}} > K_{\text{sen.3}} > K_{\text{sen.4}} >$$

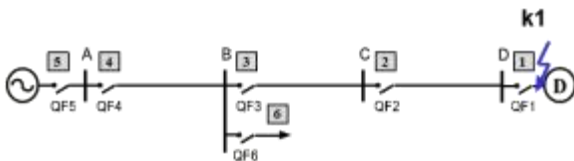


图6 电力系统图

## 4. 定时限过电流保护的评价

定时限过电流保护动作电流小，保护范围最大，灵敏度比第Ⅰ、Ⅱ段更高；保护范围是本线路和相邻下一线路全长，可以起到远后备保护的作用；但是其整定值没有选择性。

### 【例题实战】

1. 本线路的限时电流速断保护动作时间的整定原则为 ( )。
- A. 与下一级线路瞬时电流速断保护配合  
B. 与本线路瞬时电流速断保护配合  
C. 与下一级线路限时电流速断保护配合  
D. 与零序电流速断保护配合
2. 电流保护Ⅰ段的灵敏系数通常用保护范围来衡量, 其保护范围越长表明保护越 ( )。
- A. 可靠      B. 不可靠      C. 灵敏      D. 不灵敏
3. 三段式电流保护中灵敏性最好的是 ( )。
- A. Ⅰ段      B. Ⅱ段      C. Ⅲ段      D. 不确定
4. 三段式电流保护的定值和灵敏度的关系正确的是 ( )。
- A. Ⅰ段定值最大, 灵敏度最高      B. Ⅲ段定值最小, 灵敏度最高  
C. Ⅰ段定值最小, 灵敏度最高      D. Ⅲ段定值最大, 灵敏度最高
5. 对于单侧电源网络的相间短路保护, 其中第二段为 ( )。
- A. 无时限电流速断保护      B. 定时限过电流保护  
C. 限时电流速断保护      D. 反时限过电流保护

### 【答案解析】

1. 【答案】A。解析: 考察限时电流速断保护动作时间的整定原则。
2. 【答案】C。解析: 电流速断保护中灵敏校验是用保护范围不小于线路全长的15%-20%, 通常是要求保护范围越长越好, 它的灵敏系数越高; 而选项中的AB 可靠性是通过保护装置是否不拒动不误动来判断的, 不是通过灵敏系数关联的。
3. 【答案】C。解析: 三段式电流保护中, Ⅲ段能够保护本线路及下一级线路全长, 保护范围最大, Ⅲ段灵敏性最好。
4. 【答案】B。解析: 三段式电流保护中, Ⅰ保护定值最大, Ⅲ段定值最小。Ⅰ段不能保护全长, Ⅲ既能保护本线路全长, 又能保护相邻线路全长, 保护范围最大, 灵敏度最高。

5. 【答案】C。解析：第一段是无时限电流速断保护，第二段是限时电流速断保护，第三段是定时限过电流保护。

### 核心知识点 3 双侧电源网络相间短路的方向性电流保护

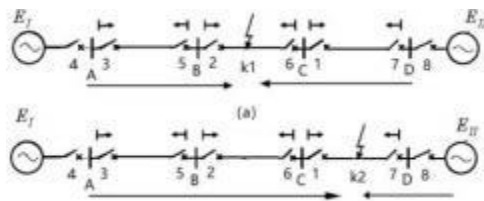


图 7 双侧电源网络相间短路的方向性电流保护

双侧电源网络中，由于两侧有电源，在每条线路两侧均需要装设断路器和保护装置。如图 7 (a) 所示，当 \$k\_1\$ 点短路时，按照选择性的要求，应该由距故障点最近的保护 2 和 6 动作切除故障。然而，由电源供给的短路电流也将通过保护 1，如果保护 1 采用电流速断且短路电流大于保护装置的启动电流，则保护 1 的电流速断就要误动作；如果保护 1 采用过电流保护且其动作时限，则保护 1 的过电流保护也将误动作。同理当图 7 (b) 中 \$k\_2\$ 点短路时，本应由保护 1 和 7 动作切除故障，但是由电源供给的短路电流将通过保护 6，如果保护 6 采用电流速断且短路电流大于保护装置的启动电流，则保护 6 的电流速断就要误动作；如果保护 6 采用过电流保护且其动作时限，则保护 6 的过电流保护也将误动作。

1. 对继电保护中功率方向元件的基本要求主要有以下两点：

应具有明确的方向性，即正方向发生各种故障（包括故障点有过渡电阻的情况）时可靠动作，反方向故障时可靠不动作。

正方向故障时继电器的动作有足够的灵敏度。

2. 功率方向继电器的动作特性：

$$(1) \text{ 功率的形式: } P = U_k I_k \cos \left( \left| \arg \frac{U_k}{I_k} - \psi_{sm} \right| \right) > 0$$

(2) 相位比较式:  $-90^{\circ} < \arg \frac{U_k^{c-j} \vartheta_{sm}}{I_k} < 90^{\circ}$ 。

### 【例题实战】

1. 三段式方向电流保护中, 各段加装方向元件的目的都是为了解决选择性的矛盾。  
( )

A. 正确 B. 错误

2. 功率方向继电器既可以按相位比较原理构成, 也可以按照幅值比较式原理构成。  
( )

A. 正确 B. 错误

3. 在双侧电源网络中, 增加了功率方向继电器后, 线路两侧保护的电流整定值只需要按照单侧电源时来计算。( )

A. 正确 B. 错误

4. 母线两侧时限较短的方向过电流保护的方向元件省去后, 仍能保证选择性。  
( )

A. 正确 B. 错误

### 【答案解析】

1. 【答案】A。解析: 双侧电源线路, 保护通过电流整定值以及动作时间无法实现选择性, 所以加装方向元件解决。

2. 【答案】A。

3. 【答案】A。解析: 在双侧电源网络中, 增加功率方向元件解决了选择性, 电流保护的整定值就只需要按照单电源的配合方式整定。

4. 【答案】B。解析: 对于过电流保护, 通过时间来实现选择性, 方向元件需要加在时限短的保护上, 如果省去, 会发生误动。

## 核心知识点 4 90°接线

所谓  $90^{\circ}$  接线方式是指在三相对称的情况下, 当  $\varphi_k = 0^{\circ}$  时, 加入继电器的电流和电压的相位相差  $90^{\circ}$  (例如与  $U_{BC}$ )。



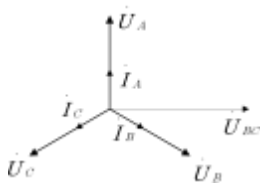


图8 90°接线方式

采用90°接线时，将三个继电器分别接于 $I_A$ 与 $U_{BC}$ ， $I_B$ 与 $U_{CA}$ ， $I_C$ 与 $U_{AB}$ 而构成的三相式方向过电流保护。

### 【例题实战】

1. 输电线路BC两相金属性短路时，短路电流 $I_{BC}$ （ ）。  
 A. 滞后于C相电压一线路阻抗角  
 B. 滞后于B相电压一线路阻抗角  
 C. 滞后于BC相间电压一线路阻抗角  
 D. 滞后于A相电压一线路阻抗
2. 90°接线方式的功率方向继电器，当 $I_k = -I_B$ 时， $\dot{U}_k$ 应为（ ）。  
 A.  $U_{CA}$       B.  $U_{BC}$       C.  $U_{AB}$       D.  $U_{AC}$

### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析：BC两相金属性短路后保护安装处的向量图如下，可知短路电流 $I_{BC}$ 滞后于BC相间电压一线路阻抗角。

2. 【答案】D。解析：当 $I_k = I_B$ 时， $\dot{U}_k$ 为 $U_{CA}$ 。因此 $I_k = -I_B$ 时， $\dot{U}_k$ 应为 $U_{AC}$ 。

## 核心知识 5 零序分量的特点

1. 故障点的零序电压最高，系统中距离故障点越远处的零序电压越低，一直到变压器的中性点处为零，变电所A、B母线上的零序电压称为零序残压；

2. 对于发生故障的线路，两端零序功率的方向与正序功率的方向相反，零序功率方向实际上都是由线路流向母线。



2.【答案】B。解析：在大电流接地系统（即中性点直接接地系统），零序电流的实际方向是线路流向母线。在做题时一定要区分中性点直接接地系统和中性点非直接接地系统。

3.【答案】A。解析：零序保护只反映接地故障，只有形成了接地短路回路才会有零序分量出现。

4.【答案】A。

5.【答案】B。解析：零序电流的大小不仅与中性点接地的变压器的数目和分布有关，而不是种类。

## 核心知识点 6 中性点不接地电网中单相接地故障的特点

在中性点非直接接地电网中发生单相接地时，由于故障点的电流很小，而且三相之间的线电压仍然保持对称，对负荷的供电没有影响，因此，在一般情况下都允许电网再继续运行 1-2 个小时，而不必立即跳闸，这是其主要优点。

在正常运行情况下，三相对地有相同的电容  $C_0$ ，在相电压作用下，每相都有一个超前相电压  $90^\circ$  的电容电流，而三相电流之和等于 0。但是在单相接地之后，故障相的对地电压为零，对地电容被短接，电容电流为零，而非故障相的对地电压升高  $\sqrt{3}$  倍，对地电容电流也相应增大  $\sqrt{3}$  倍。

### 【例题实战】

1.我国电力系统常用的三种中性点接地方式分别是（ ）。

- A.直接接地方式，经消弧线圈接地和经大电流电抗器接地方式
- B.直接接地方式，经消弧线圈接地和不接地方式
- C.不接地方式，经消弧线圈接地和经大电流电抗器接地方式
- D.不接地方式，经消弧线圈接地和经小电流电抗器接地方式

2.在小接地电流系统中，线路上发生金属性单相接地时故障相电压为零，两非故障相电压升高 3 倍，中性点电压变为相电压。三个线电压的大小和相位与接地前相比都发生了变化。（ ）

A.正确

B.错误

3.在小电流接地系统中发生单相接地故障时，其相电压基本不变。（ ）

A.正确

B.错误

### 【答案解析】

1.【答案】B。

2.【答案】B。解析：在小接地电流系统中，线路上发生金属性单相接地时故障相电压为零，两非故障相的对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，中性点电压变为相电压，而且三相之间的线电压仍然保持对称，无变化。

3.【答案】B。解析：小电流接地系统发生单相接地故障后，相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，线电压基本不变，因此可以继续运行2~3小时。

## 核心知识点 7 中性点不接地系统发生单相接地故障时零序分量的特点

1.零序网络由同级电压网络中元件对地的等值电容构成通路，其零序阻抗很大；

2.在发生单相接地故障时，相当于在故障点产生了一个幅值与故障相故障前相电压大小相等、方向相反的零序电压，从而全系统都将出现零序电压；

3.在非故障元件中流过的零序电流，其数值等于本身的对地电容电流，电容性无功功率的实际方向为由母线流向线路；

4.在故障元件中流过的零序电流，其数值为全系统非故障元件对地电容电流的总和，电容性无功功率的实际方向为由线路流向母线；

5.接地点流过的电流为全系统电容电流之和。

### 【例题实战】

1.中性点不接地系统中，单相接地故障时，故障线路上的容性无功功率的方向为由母线流向故障点。（ ）

A.正确

B.错误

2.在中性点不接地系统中发生单相接地故障时，故障线路的零序电容电流与非故障线路的零序电容电流方向（ ）。

A.相反

B.超前 $90^\circ$

C.滞后 $90^\circ$

D.相同

3. 中性点不接地电网发生单相接地后，故障线路保护安装处的零序电容电流与非故障线路中的零序电容电流相位相反。（ ）

A.正确

B.错误

### 【答案解析】

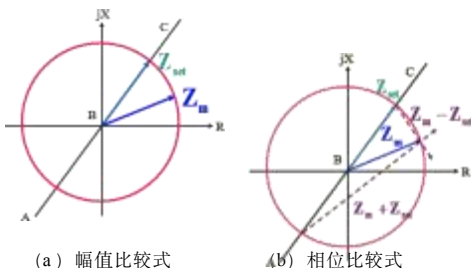
1. 【答案】B。解析：中性点不接地系统中，单相接地故障时，故障线路上的容性无功功率的方向是由线路流向母线的，而非故障线路的电流才是母线流向线路的。

2. 【答案】A。解析：在中性点不接地系统中，非故障线路的零序电容电流是由母线流向线路，故障线路的电容电流是由线路流向母线。

3. 【答案】A。解析：中性点不接地电网发生单相接地后，故障线路电容电流的方向为线路流向母线，而非故障线路的电容电流的方向为母线流向线路，所以电流相位相反。

## 核心知识点 8 阻抗继电器的动作特性

### （一）全阻抗继电器



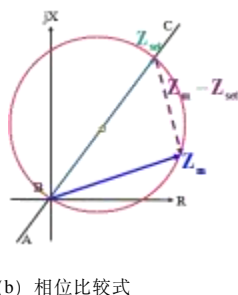
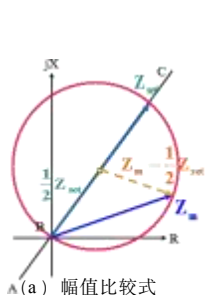
1. 幅值比较式动作判据：

$$|Z_m| < |Z_{set}|$$

2. 相位比较式动作判据：

$$-90^{\circ} < \arg \frac{Z_{\text{set}} - Z_m}{Z_{\text{set}} + Z_m} < 90^{\circ}$$

## (二) 方向阻抗继电器



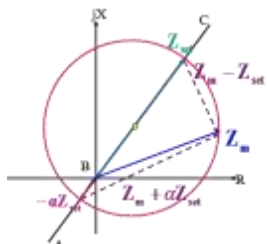
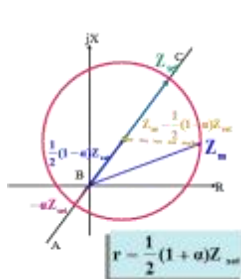
### 1. 幅值比较式的动作判据

$$\left| Z_m - \frac{1}{2} Z_{\text{set}} \right| < \left| \frac{1}{2} Z_{\text{set}} \right|$$

### 2. 相位比式的动作判据

$$-90^{\circ} < \arg \frac{Z_{\text{set}} - Z_m}{Z_m} < 90^{\circ}$$

## (三) 偏移阻抗继电器



$$r = \frac{1}{2} (1 + a) Z_{\text{set}}$$

(a) 幅值比较式

(b) 相位比较式

1. 幅值比较式的动作判据

$$\left| Z_m - \frac{1}{2}(1-C)Z_{set} \right| < \left| \frac{1}{2}(1+C)Z_{set} \right|$$

2. 相位比较式的动作判据

$$-90^\circ < \arg \frac{Z_{set} - Z_m}{Z_m + CZ_{set}} < 90^\circ$$

### 【例题实战】

1. 偏移阻抗继电器的相位比较式的动作判据 ( )。

A.  $-90^\circ < \arg \frac{Z_{set} - Z_m}{Z_{set} + Z_m} < 90^\circ$

B.  $-90^\circ < \arg \frac{Z_{set} - Z_m}{Z_m} < 90^\circ$

C.  $-90^\circ < \arg \frac{Z_{set} - Z_m}{Z_m + CZ_{set}} < 90^\circ$

D.  $-90^\circ < \arg \frac{Z_{set} + Z_m}{Z_m} < 90^\circ$

2. ( ) 阻抗特性中, 没有方向性。

A. 全阻抗继电器

B. 方向阻抗继电器

C. 偏移特性阻抗继电器

D. 都一样

### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析：A 选项属于全阻抗继电器，B 选项属于方向阻抗继电器。

2. 【答案】A。解析：全阻抗继电器没有方向性。

## 核心知识点 9 过渡电阻对距离保护的影响

### 1. 单侧电源线路上过渡电阻的影响

短路点的过渡电阻 $R_f$ 总是使继电器的测量阻抗增大，使保护范围缩短。

保护装置距短路点越近时，受过渡电阻的影响越大；同时保护装置的定值越小，则相对受过渡电阻的影响也越大。因此对短线路的距离保护应特别注意过渡电阻的影响。

### 2. 双侧电源线路上过渡电阻的影响

过渡电阻的影响呈现为感性，测量阻抗的电抗部分增大；过渡电阻的影响呈现为容性，测量阻抗的电抗部分减小，可能引起保护的无选择性动作。

### 3. 过渡电阻对不同特性阻抗元件的影响

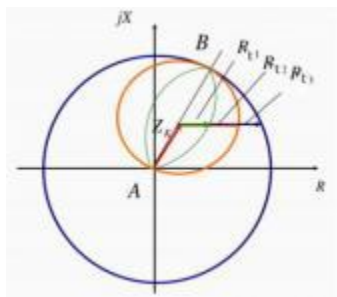


图9 过渡电阻对不同特性阻抗元件的影响

一般说来，阻抗继电器的动作特性在+R轴方向所占的面积越大则受过渡电阻 $R_f$ 的影响越小。

防止和减小过渡电阻影响的方法可采用能容许较大的过渡电阻而不致拒动阻抗继电器，如四边形特性的阻抗继电器等。

### 【例题实战】

1. 对于相同整定阻抗的阻抗继电器，以下说法正确的是（ ）。

- A. 全阻抗继电器受过渡电阻影响大
- B. 全阻抗继电器受过渡电阻影响小
- C. 方向阻抗继电器受过渡电阻影响小



#### D. 四边形阻抗继电器受过渡电阻影响大

2.故障点过渡电阻对距离保护的影响是( )。

A.对长线路大

B.对短线路大

C.与线路长短无关

D. 一样

3. 全阻抗继电器承受故障点过渡电阻的影响比方向阻抗继电器大。( )

A.正确

B. 错误

4.相间短路时故障点过渡电阻对距离保护I段影响较小。( )

A. 正确

B. 错误

5.长线路的测量阻抗受过渡电阻的影响比短线路大。( )

A.正确

B. 错误

**【答案解析】**

1. 【答案】B。解析：阻抗特性在R轴方向上面积越大，承受过渡电阻的能力越强。相同整定阻抗的全阻抗继电器和方向阻抗继电器中，全阻抗继电器在R轴方向上面积更大，受过渡电阻影响较小。

2. 【答案】B。解析：过渡电阻对距离保护的影响由于短线路中的距离保护整定值小，受过渡电阻影响大。

3. 【答案】A。解析：阻抗特性在R轴方向上面积越大，承受过渡电阻的能力越强。全阻抗特性阻抗继电器承受过渡电阻的能力比方向阻抗继电器大。

4. 【答案】A。解析：距离I段保护无动作延时，此时过渡电阻较小。

5. 【答案】B。解析：短线路中的距离保护由于整定值小而易受过渡电阻影响。

### 核心知识点 10 输电线路纵联差动保护

输电线的纵联保护，是指用某种通信通道（简称通道）将输电线两端或各端（对于多端线路）的保护装置纵向联结起来，将各端的电气量（电流、功率的方向等）传送到对端，将两端的电气量比较，以判断故障在本线路范围内还是范围外，从而决定是否切断被保护线路。理论上纵联保护具有绝对的选择性，只要是在保护范围内的各点故障都能快速切除。因此，纵联保护都可以作为主保护。

### (一) 输电线路纵联保护的传输通道

### 1. 导引线纵联保护（简称导引线保护）

导引线通道是纵联保护最早使用的通信通道，是由和被保护线路平行敷设的金属导线构成的，用来传递被保护线路各侧信息的通信通道。

用辅助导线作为通信通道的输电线纵联差动保护，有一定的局限性，如果输电线路很长，就需要架设很长的辅助导线，很不经济，并且辅助导线的参数（电阻和分布电容）会直接影响纵联保护的性能，从而在技术上也限制了这种保护用于较长的线路。所以，导引线保护在实际中只用于很短的重要输电线路，其长度一般不超过15~20km。导引线纵联保护常采用电流差动原理。

### 2. 电力线载波纵联保护（简称高频保护）

利用输电线路载波通信方式构成的纵联保护通信通道称为电力线载波通道，也常称为高频保护。输电线路是按照传输电力要求设计建造的，以输电线路作为纵联保护的通信通道传输高频信号，必须对传输的信息进行高频加工。

高频通道可用一相导线和大地构成，成为“相—地”通道，也可以用两相导线构成，成为“相—相”通道，利用“相—地”通道作为高频通道是比较经济的方案，因为它只需要在线路一相上装设构成通道的设备，称为高频加工设备，在我国得到广泛应用。它的缺点是高频信号的能量损耗和受到的干扰都比较大。

### 3. 微波纵联保护（简称微波保护）

利用150MHz~20GHz间的电磁波进行无线通信称为微波通信，相比电力线载波的50k~400kHz频段，频带要宽得多，可以同时传送很多带宽为4kHz的音频信号，因此微波通道的通信容量非常大。但微波通信纵联保护使用的频段属于超短波的无线电波，大气电离层已不能反射作用，只能在“视线”范围内传播，传输距离不超过40~60km。

### 4. 光纤纵联保护（简称光纤保护）

光纤通道是以光纤作为信号传递媒介，其工作的原理是在发送端首先要把传送的电信号，然后调制到激光器发出的激光束上，是光的强度随电信号的幅度（频率）变化而变化，并通过光纤发送出去；在接收端，检测器收到光信号后把它转换成电信号，经解调后恢复原信息。

## （二）高频通道的工作方式

### 1. 正常无高频电流方式

短期发信是指在正常运行情况下，发信机不发信，高频通道中没有高频电流通过。只有在系统中发生故障时，发信机才由启动元件启动，高频通道中才有高频电流通过。

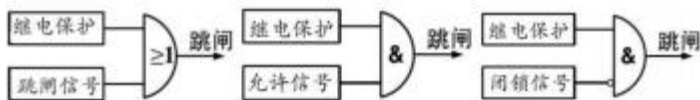
## 2.正常有高频电流方式

长期发信方式是指在正常运行情况下，收、发信机一直处于发信和收信工作状态，高频通道中始终有高频电流通过。

## 3.移频方式

移频方式是指在正常运行情况下，发信机长期发送一个频率为 $f_1$ 的高频信号，其作用是闭锁保护和对通道进行连续检查。在被保护线路发生故障时，保护控制发信机移频，改为发送频率为 $f_2$ 的高频信号。

### (三) 高频信号的类型



(a) 跳闸信号

(b) 允许信号

(c) 闭锁信号

跳闸信号逻辑回路是或门，收到这种信号是保护跳闸的充要条件。

允许信号逻辑回路是与门，收到这种信号是保护跳闸的必要条件。

闭锁信号逻辑回路是与门，收不到这种信号是保护跳闸的必要条件。

### 【例题实战】

1.按照利用通信通道的不同，纵联保护可以分为（ ）（多选）

A.导引线纵联保护

B.电力线载波纵联保

护

C.微波纵联保护

D.光纤纵联保护

2.导引线纵联保护多用于短线路保护。（ ）

A.正确

B.错误

3.电力载波信号的分类主要有（ ）

A.闭锁信号

B.允许信号

C.跳闸信号

D.合闸信号

4.关于闭锁信号动作的纵联保护的,正确的是( )

- A.两侧保护动作,且未收到闭锁信号,发出跳闸信号
- B.两侧保护动作,且收到闭锁信号,发出跳闸信号
- C.两侧保护不动作,且收到闭锁信号,发出跳闸信号
- D.两侧保护不动作,且未收到闭锁信号,发出跳闸信号

### 【答案解析】

1.【答案】ABCD。解析:按照利用通信通道的不同,纵联保护可以分为导引线纵联保护(简称导引线保护)、电力线载波纵联保护(简称载波保护)、微波纵联保护(简称微波保护)和光纤纵联保护(简称光纤保护)。

2.【答案】A。解析:导引线保护适用于10km以下的短线路保护和元件保护(比如发电机、变压器和母线等)。

3.【答案】ABC。解析:根据高频信号的作用可以将高频信号可以分为跳闸信号、允许信号和闭锁信号。

4.【答案】A。解析:闭锁信号逻辑回路是与门,只有本侧保护跳闸信号且未收到对侧高频闭锁信号时,才跳开本侧断路器。

## 核心知识点 11 高频闭锁式方向纵联保护

目前广泛应用的高频闭锁方向保护,是以高频通道经常无高频电流而在外部故障时发出闭锁信号的方式构成的。此闭锁信号由短路功率方向为负的一端发出,这个信号被两端的收信机所接收,而把保护闭锁,故称高频闭锁式方向保护。

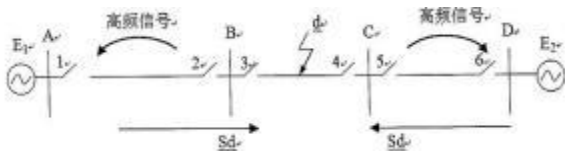


图 10 高频闭锁式方向保护的作用原理

假设故障发生于线路B-C 范围内,则短路功率 $S_d$ 的方向如图所示。

此时, 安装在线路 B-C 两端的方向高频保护 3 和 4 的功率方向为正, 保护应动作于跳闸。故保护 3 和 4 都不发出高频闭锁信号, 因而两端都收不到高频闭锁信号, 在保护启动后, 即可瞬时动作, 跳开两端的断路器。对非故障线路 A-B 和 C-D, 其靠近故障点一端的功率方向为由线路流向母线, 即功率方向为负, 则该段的保护 2 和 5 发出高频闭锁信号, 此信号一方面被自己的收信机接收, 同时经过高频通道把信号送到对端的保护 1 和 6, 使得保护装置 1、2 和 5、6 都被高频信号闭锁, 保护不会将线路 A-B 和 C-D 错误的切除。

### 【例题实战】

1. 高频闭锁式方向纵联保护主要靠远离故障侧元件发送闭锁信号。( )
- A. 正确 B. 错误
2. 高频闭锁距离保护能作为相邻元件的后备保护。( )
- A. 正确 B. 错误
3. 高频闭锁保护一侧发信机损坏，无法发信，当反方向发生故障时，对侧的高频闭锁保护会误动作。( )
- A. 正确 B. 错误

**【答案解析】**

1. 【答案】B。解析：高频闭锁方向纵联保护的闭锁信号由短路功率方向为负的一端发出，这个信号被两端的收信机所接收，而把保护闭锁。
2. 【答案】A。解析：距离保护与高频通道结合构成高频闭锁距离保护能作为相邻元件的后备保护。是以距离保护Ⅲ段作为后备保护。
3. 【答案】A。解析：采用闭锁信号时，如果发信机发生损坏，反方向故障时，由于本侧功率方向为负，不会动作，但是对侧功率方向为正，同时也没有收到闭锁信号，会误动。

## 核心知识点 12 相位比较式纵联保护

相位比较式的基本原理在于比较被保护线路两端短路电流的相位，从而判断故障的位置。在线路两端装设特性和变比完全相同的电流互感器，它们的正极性均置于靠近母线的一侧，保护范围内故障时，在理想情况下，两端电流相位相同，而当保护范围外部发生故障时，两端电流相位相差  $180^\circ$ 。

当采用高频通道经常无电流，而在外部故障时发出高频电流（即闭锁信号）方式构成保护时，在实际上可以做成当短路电流为正半周，高频发信机发出高频电流，而在负半周则不发，如此不断的交替进行。

如果是间断波则是区内故障，如果是连续波则是区外故障。

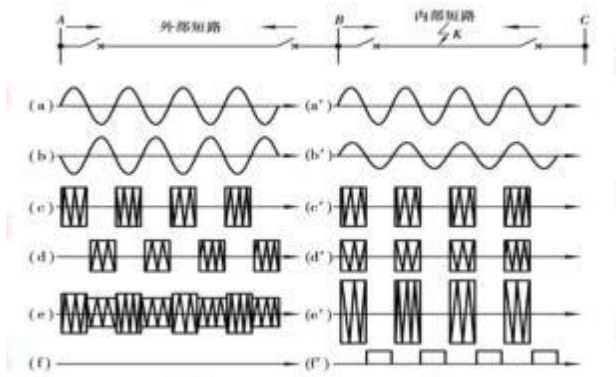


图 11 相位比较式纵联保护

### 【例题实战】

1. 相差高频保护的基本工作原理是比较被保护线路两侧短路电流的相位。( )

A. 正确

B. 错误

2. 下面哪种保护在电压二次回路断线时可不退出工作 ( )。

A. 高频闭锁距离保护

B. 相差高频保护

**【答案解析】**

- 1.【答案】A。解析：相差高频保护的基本原理是比较被保护线路两侧电流的相位。
- 2.【答案】B。解析：电压二次回路断线时可能会引起部分保护误动作，而B选项是比较电流相位，与电压无关，而其它几个保护都需要用到电压，所以在电压回路断线时不能正常工作。

**核心知识点 13 对自动重合闸装置的基本要求****1.手动跳闸时不应重合**

当运行人员手动操作或遥控操作使断路器断开时，自动重合闸装置不应自动重合。当有其他情况不允许重合时，应可以对自动重合闸进行闭锁。

**2.手动合闸于故障线路时自动重合闸不重合**

当手动合闸于故障线路时，继电保护动作使断路器跳闸后，自动重合闸装置不应重合。因为在手动合闸前，线路上还没有电压，若合闸后就存在故障，则故障多属于永久性故障。

**3.动作迅速**

在满足故障点去游离所需的时间和断路器消弧室及断路器的传动机构准备好再次动作所必须的时间的前提下，自动重合闸装置的动作时间应尽可能短，因为，故障后从断路器开到自动重合闸发出合闸脉冲的时间越短，用户的停电时间就可以相应缩短，从而可以减轻故障对用户用电和系统带来不良影响。自动重合闸动作的时间一般采用0.5~1.5s。

**4.不允许任意多次重合**

自动重合闸装置的动作次数应符合预先的规定。如一次重合闸应该只动作一次。在任何情况下，发生永久性故障时都不应使断路器错误的多次重合。因为发生永久性故障时，自动重合闸多次重合，将使系统多次遭受冲击，还可能会使断路器损坏，从而扩大事故。

**5.动作后应能自动复归**

当自动重合闸成功动作一次后，应能自动复归，准备好再次动作，对于雷击较多的线路，为了发挥自动重合闸的效果，满足这一要求更有必要。

## 6. 闭锁重合闸

(1) 自动重合闸装置应具有接收外来闭锁信号的功能。

(2) 当断路器处于不正常状态（如操作机构中的液压、气压降低等）而不允许重合时，应将自动重合闸装置闭锁。

## 7.重合闸的启动方式

应采用由控制开关的位置与断路器位置不对应的原则来启动重合闸。即当控制开关位置在合闸而断路器实际上在断开位置的情况下,使重合闸启动。

### 【例题实战】

1. 断路器工作不正常时, 重合闸装置也应该正常投入。( )

A. 正确

B. 错误

2. 自动重合闸可以没有动作次数的限制, 直到正常供电。( )

A.正确

B. 错误

3.手动合闸于故障线路时，继电保护动作使断路器跳闸后，自动重合闸装置应重合。( )

A.正确

B. 错误

4. 自动重合闸采用操作系统液压过低闭锁时，如断路器动作后液压过低，自动重合闸将（ ）。

### A. 自动合闸

### B. 延时合闸

C.不应动作

D. 不确定

**【答案解析】**

1. 【答案】B。解析：断路器工作不正常时，重合闸应闭锁。

2. 【答案】B。解析：在采用重合闸以后，当重合于永久性故障上时，将带来一些不利影响，因此，一般不允许重合闸的次数大于两次。





A.正确

B.错误

4.当双侧电源线路两侧重合闸均只投入检查同期方式时,将造成( )。

A.两侧重合闸均启动

B.非同期合闸

C.两侧重合闸均不启动

D.一侧重合闸启动,另一侧重合闸不启动

### 【答案解析】

1.【答案】B。解析:在检定同步的一侧,其无电压检定是绝对不允许同时投入的。

2.【答案】C。解析:两侧电源同期的条件:电压大小相等、相位相同、频率相同。故检查两侧电源满足同期条件,实质上就是要求两侧电源的电压差、频率差和相位差都在一定的允许范围内才允许重合闸。

3.【答案】B。解析:为防止非同期合闸,应该先检无压后检同期。

4.【答案】C。解析:两侧重合闸均投入检查同期方式时,由于线路上没有电压,同期检查不会启动,两侧重合闸均不启动。

## 核心知识点 15 重合闸与继电保护的配合

### (一) 前加速保护的動作方式

1.重合闸采用前加速的优点:

- (1) 能够快速地切除瞬时性故障;
- (2) 能使瞬时性故障来不及发展成永久性故障,从而提高重合闸的成功率;
- (3) 使用设备少,只需装设一套重合闸装置,简单经济。

2.重合闸采用前加速的缺点:

- (1) 断路器工作条件恶劣,动作次数较多;
- (2) 重合于永久性故障时,故障切除的时间可能较长;
- (3) 如果重合闸装置故障或断路器拒合时,将扩大停电范围。

### (二) 后加速保护的動作方式

1.重合闸采用后加速的优点:

(1) 第一次是有选择性地切除故障，不会扩大停电范围，特别是在重要的高压电网中，一般不允许保护无选择性地动作而后以重合闸来纠正（即前加速）；

(2) 保证了永久故障能瞬时切除, 并且仍然有选择性。

(3) 和前加速相比,使用中不受网络结构和负荷条件的限制,一般来说是利而无害的。

2.重合闸采用后加速的缺点:

(1) 每个断路器上都要装设一套重合闸;

(2) 第一次切除故障可能帶有延時。

### 【例题实战】

1.重合闸采用前加速的优点 ( )。

- A.使用设备少  
B.断路器动作频繁  
C.能无时限切断瞬时故障  
D.初次跳闸无选择性

2.重合闸采用后加速的特点 ( )。

- A.第一次是有选择性地切除故障，不会扩大停电范围

3.重合闸前加速保护常用在100kV及以上电压等级线路上。( )

- A.正确 B.错误

4.重合闸前加速保护, 全线只需安装一套重合闸设备即可。( )

- A.正确 B.错误

5.重合闸后加速保护第一次动作可能有延时。( )

- A.正确 B.错误

**【答案解析】**

1. 【答案】AC。解析：重合闸前加速保护采用前加速的优点：（1）能够迅速地切除瞬时性故障；（2）能使瞬时性故障来不及发展成永久性故障，从而提高重合闸的成功率；（3）使用设备少，只需装设一套重合闸装置，简单经济。

2. 【答案】ABCD。解析：重合闸采用后加速的优点：（1）第一次是有选择性地切除故障，不会扩大停电范围，特别是在重要的高压电网中，一般不允许保护无选择性地动作而后以重合闸来纠正（即前加速）；（2）和前加速相比，使用中不受网络结构和负荷条件的限制，一般来说是有利而无害的。重合闸采用后加速的缺点：（1）每个断路器上都要装设一套重合闸；（2）第一次切除故障可能带有延时。

3. 【答案】B。解析：前加速保护方式主要适用于35kV及以下由发电厂或主要变电站引出的直线上，以便快速切除故障，保护母线电压。

4. 【答案】A。解析：重合闸前加速保护，只需装设一套重合闸装置。

5. 【答案】A。解析：重合闸后加速保护第一次动作具有选择性，可能有延时。

## 核心知识点 16 变压器的保护配置

变压器的主保护通常采用瓦斯保护、纵差保护和电流速断保护。

### 1. 瓦斯保护

电力变压器通常是利用变压器油作为绝缘和冷却介质，当变压器油箱内故障时，在故障电流和故障点电弧的作用下，变压器油和其他绝缘材料会因受热而分解，产生大量气体。气体排出的多少以及排出速度，与变压器故障的严重程度有关。利用这种气体来实现保护的装置，称为瓦斯保护。

### 2. 纵差动保护或电流速断保护

纵差保护和电流速断保护可用于防御变压器绕组和引出线的各种相间短路、绕组的匝间短路以及中性点接地侧绕组和引出线的单相接地短路。

### 【例题实战】

1. 变压器瓦斯保护的主要元件是（ ）。

- A. 气体继电器
- B. 电流继电器
- C. 电压继电器
- D. 阻抗继电器

2. 变压器过负荷保护动作后（ ）。

- A. 延时动作于信号
- B. 跳开变压器各侧断路器

C.给出轻瓦斯信号

D.以上都不对

### 【答案解析】

1.【答案】A。解析：瓦斯保护为非电气量保护，主要元件是气体继电器。

2.【答案】A。解析：过负荷保护为变压器后备保护，延时动作。

## 核心知识点 17 母线保护

1.在正常运行以及母线保护范围以外故障时，在母线上所有连接元件中，流入的电流和流出的电流相等；

2.当母线发生故障时，所有与母线连接的元件都向故障点供给短路电流或流出残留的负荷电流，这些电流之和等于短路点的总电流；

3.从每个连接元件中电流的相位来看，在正常运行及外部故障时，至少有一个元件中的电流相位和其余元件中的电流相位是相反的。具体来说，就是电流流入的元件和电流流出的元件中电流的相位相反。而当母线故障时，除电流等于零的元件以外，其余元件中的电流相位是接近相同的。

### 【例题实战】

1.电流比相式母线保护的工作原理是（ ）。

A.比较电流相位的变化                      B.比较电流大小的变化  
C.比较功率因数角的变化                      D.比较电压相位的变化

2.当母线上发生故障时，下列关于故障点的电流说法正确的是（ ）。

A.故障点的电流为各点电流之和  
B.故障点电流为正常运行的负荷电流的0.8倍  
C.故障点的电流为正常的负荷电流  
D.故障点电流为0

### 【答案解析】

1. 【答案】A。解析：电流比相式是比较电流的相位，内部故障时相位，除了电流为0的，其它元件电流相位接近相同，正常运行及外部故障时，至少有一个元件的相位与其余元件电流之和的相位是相反的。

2. 【答案】A。解析：故障点汇集全部短路电流，电流最大，远大于正常的负荷电流。

## 六、高电压技术

### 核心知识点 1 带电质点的产生

#### (一) 电离是气体放电的首要前提

电离——产生带电离子的物理过程称为电离。

激励——在常态下，电子受外界因素影响由低能量级轨道上跃迁到高能量级轨道的现象称为激励。

#### (二) 电离的几种形式

##### 1. 光电离

频率为  $\nu$  的光子能量为  $W = h\nu$

发生空间光电离的条件为  $h\nu > W_i$  或者  $\lambda < \frac{hc}{W_i}$

$W_i$ ——气体的电离能，eV。

##### 2. 碰撞电离

主要是电子碰撞电离。原因：

电子小，自由程长，可以加速到很大的速度。

电子的质量小，可以加速到很大。

产生条件：
$$W = \left( \frac{1}{2} m v^2 + \text{势能} \right) > W_i$$
$$= (Exq + \text{势能})$$

所以提高场强可以使碰撞电离加剧。

##### 3. 热电离

在常温下，气体分子发生热电离的概率极小。是气体在热状态下光电离和撞击电离的综合。

#### 4. 表面电离

电子从金属表面逸出需要一定的能量，称为逸出功。主要发生在阴极，原因：阳极自由电子不会向气体中释放。

主要有4种形式:

- a. 正离子撞击阴极表面  
b. 光电子发射  
c. 热电子发射  
d. 强场发射 (冷发射)

### 【例题实战】

1. 下列哪个金属的逸出功最高 ( ) 。  
A. 铝  
B. 银  
C. 铜  
D. 氧化铜
2. 下列哪个金属的逸出功最低 ( ) 。  
A. 铝  
B. 银  
C. 铜  
D. 氧化铜
3. 不产生游离作用的形式是 ( ) 。  
A. 碰撞  
B. 加热  
C. 光照  
D. 附着
4. 在气体放电过程中, 与气体原子相撞产生碰撞游离的是 ( )  
A. 离子  
B. 分子  
C. 质子  
D. 电子
5. 气体内的各种粒子因电场做加速运动而动能增加, 发生相互碰撞而产生游离的形式称为 ( ) 。  
A. 碰撞游离  
B. 光游离  
C. 热游离  
D. 表面游离



### 【答案解析】

1. 【答案】D。解析：金属的逸出功要比气体分子的电离能小得多，金属表面电离比气体空间电离容易发生。

2. 【答案】A。解析：金属的逸出功要比气体分子的电离能小得多，金属表面电离比气体空间电离容易发生。

3. 【答案】D。

4. 【答案】D。解析：在电场中获得加速的电子在和气体分子碰撞时，可以把自己动能转给后者引起碰撞电离。

5. 【答案】A。解析：碰撞游离是指在电场中获得加速的电子在和气体分子碰撞时，使气体发生电离。光游离是指短波长的高能辐射线使气体发生电离。热游离是指气体内的各种粒子因高温而动能增加，发生相互碰撞而产生游离。表面游离是指电子从金属表面逸出至气体中的游离。

## 核心知识点 2 伏秒特性

### （一）气隙的伏秒特性

在同一波形，不同幅值的冲击电压作用下，气隙上出现的电压最大值和放电时间的关系，称为该气隙的伏秒特性。

50%冲击击穿电压（ $U_{50\%}$ ）——指某气隙被击穿的概率为50%的冲击电压峰值。

冲击系数 $\beta$ —— $U_{50\%}$ 与静态击穿电压 $U_s$ 之比称为冲击系数 $\beta$ 。均匀和稍不均匀电场下冲击击穿电压的分散性很小，冲击系数 $\beta \approx 1$ 。极不均匀电场中由于放电时延较长，冲击系数 $\beta$ 均大于1。

## （二）伏秒特性曲线的应用

在保护设备和被保护设备的绝缘配合上具有重要的意义。是防雷设计中实现保护设备和被保护设备的绝缘配合的依据。

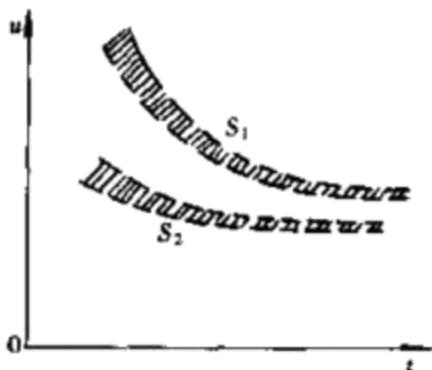


图1 两个气隙的伏秒特性带没有交叉的情况

举例：如果一个电压同时作用在两个并联的气隙S1和S2上，其中一个气隙先被击穿了，则电压被短接截断，另一个气隙就不会再被击穿了。这个原则如用于保护装置和被保护设备，那就是前者保护了后备。设前者的伏秒特性以S2记之，后者的以S1记之，如图情况。

### 【例题实战】

1. 伏秒特性曲线实际上是一条带状区域，因为在冲击电压作用下，间隙放电时间具有（ ）。

- A. 时延性
- B. 准确性
- C. 统计性
- D. 50%的概率

2. 保护设备 S1 的伏秒特性  $V_1-t$  与被保护设备 S2 的伏秒特性  $V_2-t$  合理的配合是 ( )。

A.  $V_1-t$  始终高于  $V_2-t$

B.  $V_1-t$  始终低于  $V_2-t$

C.  $V_1-t$  先高于  $V_2-t$ ，后低于  $V_2-t$

D.  $V_1-t$  先低于  $V_2-t$ ，后高于  $V_2-t$

3. 伏秒特性主要用于比较不同设备绝缘的冲击击穿特性。( )

A. 正确

B. 错误

### 【答案解析】

1. 【答案】 【答案】 C。解析：伏秒特性：工程上用气隙上出现的电压最大值与放电时间的关系来表征气隙在冲击电压下的击穿特性，称为气隙的伏秒特性。伏秒特性曲线用实验方法求得，击穿时间具有分散性，结果具有统计性。

2. 【答案】 A。解析：伏秒特性曲线是指在冲击电压波形一定的前提下，绝缘（包括固体介质、液体介质或气体介质的绝缘以及由不同介质构成的组合绝缘）的冲击放电电压与相应的放电时间的关系曲线。

再结合图谱来看（方便理解）

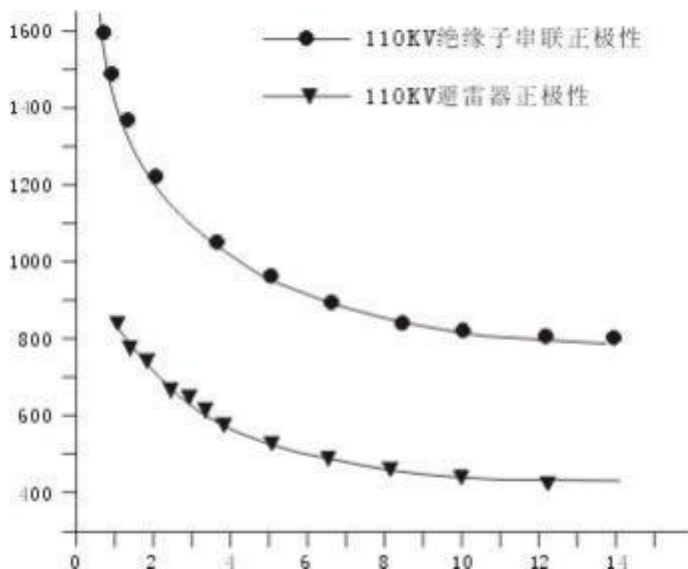


图2 伏秒特性曲线

从图中可以看出，避雷器的伏秒特性比较平坦，绝缘子串的伏秒特性相对来说陡一些，当电压在900kV一下的时候，避雷器能够先与绝缘子串放电，对过电压吸收，从而防止绝缘子闪络，保护设备的绝缘。

3. 【答案】A。解析：伏秒特性曲线是指在冲击电压波形一定的前提下，绝缘（包括固体介质、液体介质或气体介质的绝缘以及由不同介质构成的组合绝缘）的冲击放电电压与相应的放电时间的关系曲线。

## 核心知识点 3 介质损耗角正切值的测量

### (1) 西林电桥的基本原理

西林电桥是一种交流电桥，配以合适的标准电容可以测量材料和电气设备的 $\tan\delta$ 和电容值。

QS-1 型西林电桥是一种平衡电桥，由四个桥臂 $R_3$ 、 $R_4$ 和 $C_4$ 、 $C_N$ 及 $C_X$ 和一个检流计构成。电桥的平衡是通过调整 $R_3$ 和 $C_4$ 来实现的。

#### 1. 测量接线

##### (1) 正接线

被试品处于高压侧，两端均对地绝缘，此时桥体处于低压侧，操作安全方便，测量结果也比较准确。适用于两端对地绝缘的被试品。

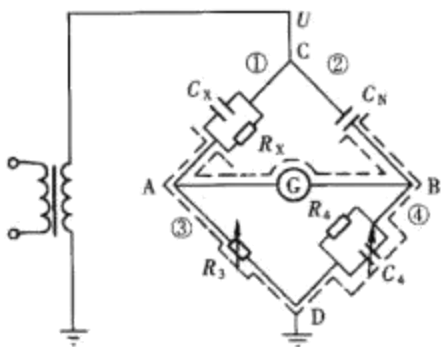


图3 西林电桥正接法

## (2) 反接线

此时各个调节元件、检流计和屏蔽网均处于高电位，故必须保证足够的绝缘水平和采取可靠的保护措施。适用于一端接地的被试品。

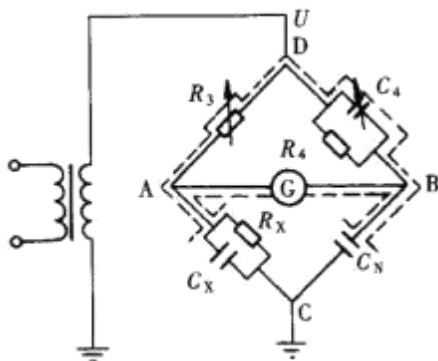


图4 西林电桥反接法

## (二) 测量过程中的干扰及消除措施

### 1. 电场干扰

外界电场干扰主要是干扰电源（包括试验用高压电源和现场高压带电体）通过带电设备与被试设备之间的电容耦合造成的。

### 2. 消除或减小电场干扰的措施：

#### (1) 加设屏障

在被试品高压部分加屏蔽罩，并将屏蔽罩与电桥的屏蔽相连，以消除耦合电容的影响。

#### (2) 采用移相电源

通常在试验电源和干扰电流同相和反相两种情况下分别测两次，然后取平均值。

### 3. 磁场干扰

当电桥靠近漏磁通较大的设备时，会受到磁场的干扰。这一干扰主要是由于磁场作用与电桥检流计内的电流线圈回路引起的。

#### 4.措施

(1) 将电桥移至磁场干扰范围以外，或将桥体就地转动改变角度找到干扰的最小方位。

(2) 或将检流计极性转换开关分别置于正、反两个位置测量两次来消除磁场干扰的影响。

### (三) 测试功效

#### 1.测试 $\tan\delta$ 能有效发现绝缘的下列缺陷：

- (1) 受潮；
- (2) 贯穿性导电通道；
- (3) 绝缘老化劣化，绕组上积附油泥；
- (4) 绝缘内含气泡的电离，绝缘分层；
- (5) 绝缘油脏污、劣化等。

#### 2.测试 $\tan\delta$ 对于下列缺陷不太灵敏：

- (1) 非贯穿性的局部损坏；
- (2) 很小部分绝缘的老化劣化；
- (3) 个别的绝缘弱点。

即测量 $\tan\delta$ 对较大面积的分布性的绝缘缺陷较灵敏，对个别局部的非贯穿性的绝缘缺陷不灵敏。

用测量 $\tan\delta$ 的方法分析绝缘时，要求 $\tan\delta$ 不应有明显的增加或下降。因为当绝缘有缺陷时，有的使 $\tan\delta$ 增大，有的使 $\tan\delta$ 减小。如某变压器进水受潮，但测 $\tan\delta$ 却下降。进水后既可导致有功功率 $P$ 增加（ $IR$ 增大），也可导致无功功率 $Q$ 增大（水的介电常数大， $ICX$ 增大）。

### 【例题实战】

1. 电容大小为C 的固体电介质在角频率为 $\omega$  的电压U作用下, 测得电介质损耗正切值为 $\tan\delta$ , 则电介质的有功损耗为 ( )。

A.  $P = U^2 \omega C \tan\delta$

B.  $P = U \omega C \tan\delta$

C.  $P = U \omega C^2 \tan\delta$

D.  $P = U \omega C \tan\delta^2$

2. 在有强电场干扰的现场, 测量试品介质损耗因数 $\tan\delta$ , 有多种抗干扰测量方法, 并各有一定的局限性, 但下列项目 ( ) 中的说法是错的。

A. 选相倒相法: 正、反相测得值的差别较大, 有时可达 $\pm 50\%$ 及以上

B. 外加反干扰电源补偿法: 补偿电源与干扰信号间的相位有不确定性

C. 变频测量方法: 测量的稳定性、重复性及准确性较差

D. “过零比较”检测方法: 测量结果的分散性稍大

3. 当整个绝缘普遍劣化, 大面积受潮时, 有效的试验判断方法是 ( )。

A. 测泄漏电流

B. 测直流电阻

C. 测介质损耗因数

D. 测绝缘电阻

### 【答案解析】

1. 【答案】A。解析: 固体电介质的有功损耗为 $P = U^2 \omega C \tan\delta$ 。

2. 【答案】C。解析: 干扰十分严重时, 变频测量能得到准确可靠的效果。

3. 【答案】C。解析: 介质损耗角因数能反映绝缘的整体性缺陷 (如全面老化) 和小电容试品中的严重局部性缺陷。



## 核心知识点 4 防雷保护装置

### （一）防雷保护装置的作用

1. 防雷保护装置：保护物体避免雷击，而引雷于本身，并顺利泄入大地的装置。
2. 避雷针、避雷线：可以防止雷电直接击中被保护物体，也称作直击雷保护（措施）。
3. 避雷器：防止沿输电线侵入变电所的雷电过电压波，因此也称作侵入波保护（措施）。
4. 接地装置：减少避雷针（线）或避雷器与大地（零电位）之间的电阻值，以达到降低雷电过电压幅值的目的。

### （二）避雷针和避雷线

#### 1. 避雷针

绕击率：绕击指雷电绕过避雷装置而击于被保护物的现象，绕击率即为其概率。我国所指的保护范围是对应0.1%的绕击率而言的。

避雷针保护第一要对直击雷屏蔽，第二要防反击（避雷针与被保护物之间的空隙击穿）。

#### 2. 避雷线

作用：主要用于输电线路的保护，也可用来保护发电厂和变电所。

保护范围：避雷线的保护范围的长度与线路等长，而且两端还有其保护的半个圆锥体空间。

保护角 $\alpha$ ：表示避雷线的保护程度，指避雷线铅垂线与避雷线和边导线连线的夹角。

保护角越小，雷击导线的概率越小，对导线的屏蔽保护越可靠。

对于110kV及以上的架空输电线路一般都沿全线装设避雷线。

110kV线路的保护角： $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$

220-330kV线路的保护角： $20^{\circ}$ 左右

500kV：一般不大于 $15^{\circ}$

### (三) 避雷器

#### 1.作用

限制雷电过电压，以保护电器设备。

#### 2.类型

(1) 保护间隙、管型避雷器、阀型避雷器、金属氧化物避雷器。

(2) 要求

①正常工作隔离导线与地之间（放电电压略高于系统最大工作电压）；

②动作时限制雷电侵入波（伏秒特性平坦）

③动作后可靠地切断工频续流（良好的绝缘子自恢复能力）

④动作后不产生截波

#### 3.保护间隙

优点：结构简单，造价低。

缺点：伏秒特性很陡，不易配合；产生工频续流；动作后会产生截波。

适用范围：不重要和单相接地不会导致严重后果的场合，如低压配电网和中性点非有效接地电网。

#### 4.管型避雷器（排气式避雷器）

实质：一种具有较高熄弧能力的保护间隙。

缺点：伏秒特性很陡，不易配合；形成截波；运行维护麻烦。

适用范围：仅装设在输电线路绝缘薄弱的地方（大跨越、交叉跨越）和发电厂、变电所的进线段保护中。

#### 5.阀型避雷器

结构：火花间隙和非线性电阻阀片（SiC）串联组成。

间隙作用：隔离；限到雷电侵入波在阀片配合下切断工频续流。

阀片作用：提供残压小防截波；限制工频续流，配合间隙灭弧。

阀型避雷器从间隙击穿到工频续流切断不超过半个周期，而且工频续流数值不大，因此，电网在整个过程均保持正常供电

阀型避雷器分类：普通型和磁吹型。

阀型避雷器电气特性参数

(1) 额定电压：正常运行时作用在避雷器上的工频工作电压

(2) 灭弧电压：在工频续流第一次经过零值时灭弧条件下，允许加在避雷器上的最高工频电压；

(3) 冲击放电电压：标准雷电冲击波、标准操作冲击波下的放电电压（幅值）的上限；

(4) 工频放电电压：施加逐渐升高的工频电压，直至避雷器的间隙或者绝缘介质放电击穿；

(5) 残压：雷电流流过避雷器时在阀片电阻上产生的电压降，我国规定流过避雷器的雷电流大小为 5kA（330kV 及以上为 10kA）的残压作为设计依据

(6) 切断比：工频放电电压的下限与灭弧电压之比；切断比越接近于 1，说明火花间隙灭弧能力越强

(7) 保护比：残压与灭弧电压之比；保护比越小，说明该避雷器的保护性能越好

#### 6.金属氧化物避雷器（MOA）

金属氧化物避雷器的非线性电阻阀片主要成分是氧化锌（ZnO）。

优点

①省去串联火花间隙，结构简化，体积小，造价低

②保护性能优越

③无续流、动作负载轻、能重复动作实施保护

④通流容量大，能制成重载避雷器

⑤耐污性能好

⑥易做成直流系统避雷器图识点

#### 7.氧化锌避雷器电气特性参数

(1) 额定电压：避雷器能较长期耐受的最大工频电压有效值，即在系统中发生短时工频电压升高时，避雷器亦能正常可靠地工作一段时间。

(2) 容许最大持续运行电压（MCOV）：避雷器能长期持续运行的最大工频电压有效值，其值一般应等于系统的最高工作相电压。

(3) 参考电压（亦称转折电压或起始动作电压）：ZnO 阀片伏安特性曲线由小电流区上升部分进入大电流区平坦部分的转折处，通常以通过 1mA 电流时的电压  $U_{1mA}$  作为参考电压。

(4) 残压：放电电流通过避雷器时，其端子间出现的电压峰值，包括雷电冲击电流下的残压、操作冲击电流下的残压、陡波冲击电流下的残压。

(5) 保护水平雷电保护水平为下列两值中的较大者：

①雷电冲击残压；②陡波冲击残压除以 1.15

操作保护水平等于操作冲击残压。

(6) 压比：避雷器在波形为 8/20 $\mu$ s 的冲击电流作用下的残压与参考电压之比；压比越小，非线性越好。

(7) 荷电率（AVR）：容许最大持续运行电压的幅值与参考电压之比；荷电率的高低直接影响到避雷器的老化过程。

#### **(四) 接地**

各种防雷保护装置（避雷针、避雷线、避雷器）都必须配以合适的接地装置，将雷电泻入大地，才能有效的发挥其保护作用。

##### **1. 接地的概念**

将地面上的金属物体或电气回路中的某一节点通过导体与大地保持等电位。

##### **2. 接地的分类**

工作接地、保护接地、防雷接地

###### **(1) 工作接地**

根据电力系统正常运行需要而设置的接地（0.5 ~ 10 $\Omega$ ）。

###### **(2) 保护接地**

不是为正常工作而设定，为了人身安全而装设的接地装置，在故障运行条件下发挥作用（1 ~ 10 $\Omega$ ）。

###### **(3) 防雷接地**

用来将雷电流顺利泻入大地，以减小它所引起的过电压，性质介于前两种接地之间，一般在故障情况下发挥作用（1 ~ 30 $\Omega$ ）。

### 【例题实战】

1. 电流通过避雷器阀片电阻时, 产生的压降称为 ( )。

- A. 额定电压
- B. 冲击放电电压
- C. 残压
- D. 灭弧电压

2. 氧化锌避雷器具有的明显特点是 ( )。

- A. 能大量吸收工频续流能量
- B. 能在较高的冲击电压下泄放电流
- C. 陡波响应能得到大大改善
- D. 在相同电压作用下可减少阀片数

3. 超高压输电线路防雷措施最普遍使用的是 ( )。

- A. 避雷针
- B. 避雷线
- C. 避雷器
- D. 放电间隙

4. 架空输电线路防护直击雷的主要措施是装设 ( )。

- A. 避雷器
- B. 避雷针
- C. 电阻
- D. 避雷线

5. 变电站直击雷防护的主要装置是 ( )。

- A. 避雷针
- B. 避雷线
- C. 避雷器
- D. 放电间隙

### 【答案解析】

1. 【答案】C。解析: 冲击电流通过避雷器时, 在工作电阻上产生的电压峰值称为残压。

2. 【答案】C。解析: 由于氧化锌阀片具有优异的非线性伏安特性, 而且没有火花间隙, 一旦作用电压开始升高, 阀片立即开始吸收过电压的能量, 抑制过电压的发展。没有间隙的放电时延, 因而具有良好的陡波响应特性, 特别适合于伏秒特性十分平坦

的SF6组合电器和气体绝缘变电所的保护。另外，氧化锌避雷器的续流仅为微安级，实际上可认为无续流，不需吸收续流能量。

3.【答案】B。解析：避雷针比较适宜用于像变电所、发电厂那样相对集中的保护对象，而像架空线路那样伸展很广的保护对象应采用避雷线。

4.【答案】D。解析：架设避雷线是输电线路防雷保护的最基本和最有效的措施。避雷线的主要作用是防止雷直击导线，同时还具有以下作用：1) 分流作用，以减小流经杆塔的雷电流，从而降低塔顶电位；2) 通过对导线的耦合作用可以减小线路绝缘子的电压；3) 对导线的屏蔽作用还可以降低导线上的感应过电压。

5.【答案】A。解析：为了防护变电站免遭直击雷过电压的破坏，我国大多数变电所采用的是避雷针。

## 核心知识点 5 切除空载线路过电压

### (一) 产生原因

切除空载线路是电力系统中常见的操作之一。产生过电压的原因是断路器分闸过程中的电弧重燃现象。

切除空载线路时引起的操作过电压幅值大、持续时间长。

### (二) 影响因素

(1) 电弧发生与熄灭的随机性

提前重燃，过电压下降。

第二次过零后熄弧，线路残留电压低，过电压下降。

(2) 母线出线数

未分闸线路电容对电荷的中和作用，过电压下降。

(3) 线路负载及电磁式电压互感器

残余电荷释放，降低过电压（最高降30%）。

(4) 中性点接地方式

中性点直接接地，各相独立，实测不大于3倍。

中性点非有效接地，开关分闸不同期，使中性点偏移，过电压可能增大，较中性点直接接地约高20%。

### （三）限制措施

- 1.提高断路器的灭弧性能，减少或避免电弧重燃；
  - 2.在断路器中加装并联分闸电阻；（作用：降低断路器触头间的恢复电压和降低重燃后的过电压）
  - 3.装设避雷器。
- ZnO 或磁吹避雷器安装在线路首端和末端，能有效地限制这种过电压的幅值。

### 【例题实战】

- 1.产生切除空载线路过电压的根本原因是( )
- A.电弧重燃  
B.绝缘子发生闪络  
C.杆塔接地电阻过大  
D.杆塔接地电阻过小
- 2.要想避免切空线过电压,最根本的措施就是要改进断路器的绝缘性能。( )
- A.正确  
B.错误
- 3.要想避免切空线过电压,最根本的措施就是改进断路器的( )。
- A.导电性  
B.绝缘性  
C.灭弧性  
D.接触性
- 4.电压等级在330kV起主导作用的操作过电压类型是( )。
- A.切除空载线路过电压  
B.电弧接地过电压  
C.切除空载变压器过电压  
D.合空载线路过电压

### 【答案解析】

1. 【答案】A。解析：断路器中电弧重燃是产生切空载线路过电压的根本原因。
2. 【答案】B。解析：断路器中电弧的重燃是产生切空线过电压的根本原因，因此要避免切空线过电压，最根本的措施就是要改进断路器的灭弧性能。
3. 【答案】C。解析：断路器中电弧的重燃是产生切空线过电压的根本原因。
4. 【答案】D。解析：6-10kV、35-60kV 电压等级中起主导作用的操作过电压类型是电弧接地过电压。110-220kV 电压等级中起主导作用的操作过电压类型是：切空载变压器过电压和切除空载线路过电压。330-500kV 电压等级中起主导作用的操作过电压类型是合空载线路过电压。

## 核心知识点 6 切除空载变压器过电压

### （一）产生原因

截流现象：流过电感的电流在到达自然零点前被断路器强行切断，使得储存在电感中的磁场能量被强迫转化为电场能，导致电压的升高。

切空变容易发生截流现象。

由于励磁电流很小，而断路器的去游离作用又很强，故当电流不为零时，就会发生强制熄弧的截流现象。

### （二）影响因素

1. 断路器的性能(灭弧能力越强，切断电流能力越强，过电压越高)；
2. 变压器的参数(电感越大，电容越小，过电压越高)。



### **(三) 限制措施**

变压器侧加装阀式避雷器。

考虑到一般变压器高压绕组的绝缘裕度较中压和低压绕组低，以及限制大气过电压和其他类型操作过电压的需要，高压侧总装有避雷器。

### **【例题实战】**

1. 断路器不同期的切合也会引起过电压，这类过电压称为（ ）。

- A. 切空变过电压
- B. 合空线过电压
- C. 工频过电压
- D. 谐振过电压

2. 断路器的重燃可以增大（ ）过电压。

- A. 间歇电弧接地
- B. 切空变
- C. 切空线
- D. 合空线

3. 目前切空变过电压的主要限制措施是采用保护间隙避雷器。（ ）

- A. 正确
- B. 错误

### 【答案解析】

1. 【答案】B。解析：电源电压在合闸瞬间的瞬时值取决于相位，是一个随机量。

2. 【答案】C。解析：切除空载变压器引起过电压的原因：电弧熄弧，电感能量转化为电容能量、

在正常运行时，空载变压器可等值为一激磁电感，因此切除空载变压器相当于切除一个小容量的电感负荷。

在切断小电感电流时，由于能量小，通常弧道中的电离并不强烈，电弧很不稳定；加之断路器去电离作用很强，可能在工频电流过零前使电弧电流截断而强制熄弧。

由于截流留在电感中的磁场能量转化为电容上的电场能量，从而产生了过电压。

3. 【答案】B。解析：切空变过电压的幅值是比较大的，但是持续时间短、能量小，因而要加以限制并不困难，采用普通阀式避雷器也能有效地加以限制和保护。

## 七、电气设备与主系统

### 核心知识点 1 一次设备

直接生产、转换和输配电能的设备，称为一次设备，主要有九种。

#### （一）生产和转换电能的设备

生产和转换电能的设备有同步发电机、变压器及电动机，它们主要都是按电磁感应原理工作的。

1. 同步发电机。同步发电机的作用是将机械能转换成电能。
2. 变压器。变压器的作用是将电压升高或降低，以满足输配电需要。
3. 电动机。电动的作用是将电能转换成机械能，用于拖动各种机械。发电厂、变电所使用的电动机，绝大多数是异步电动机，或称感应电动机。

#### （二）开关电器

开关电器的作用是接通或断开电路。高压开关电器主要有以下几种：

1. 断路器（俗称开关）。断路器可用来接通或断开电路的正常工作电流、过负荷电流或短路电流，有灭弧装置，是电力系统中最重要的控制和保护电器。
2. 隔离开关（俗称刀闸）。隔离开关用来在检修设备时隔离电压，进行电路的切换操作及接通或断开小电流电路。它没有灭弧装置，一般只有电路断开的情况下才能操作。在各种电气设备中，隔离开关的使用是最多的。
3. 熔断器（俗称保险）。熔断器用来断开电路的过负荷电流或短路电流，保护电气设备免受过载和短路电流的危害。熔断器不能用来接通或断开正常工作电流，必须与其他开关电器配合使用。

#### （三）限流电器

限流电器包括串联在电路中的普通电抗器和分裂电抗器，其作用是限制短路电流，使发电厂或变电所能选择轻型电器。

#### （四）载流导体

1. 母线。母线用来汇集和分配电能或将发电机、变压器与配电装置连接，有敞露母线和封闭母线之分。
2. 架空线和电缆线。架空线和电缆用来传输电能。

### **(五) 补偿设备**

1. 调相机。调相机是一种不带机械负荷运行的同步电动机，主要用来向系统输出感性无功功率，以调节电压控制点或地区的电压。

2. 电力电容器。电力电容器补偿有并联和串联补偿两类。并联补偿是将电容器与用电设备并联，它发出无功功率，供给本地区需要，避免长距离输送无功，减少线路电能损耗和电压损耗，提高系统供电能力；串联补偿是将电容器与线路串联，抵消系统的部分感抗，提高系统的电压水平，也相应地减少系统的功率损失。

3. 消弧线圈。消弧线圈用来补偿小接地电流系统的单相接地电容电流，以利于熄灭电弧。

4. 并联电抗器。并联电抗器一般装设在 330kV 及以上超高压配电装置的某些线路侧。其作用主要是吸收过剩的无功功率，改善沿线路电压分布和无功分布，降低有功损耗，提高送电效率。

### **(六) 仪用互感器**

电流互感器作用是将交流大电流变成小电流（5A 或 1A），供电给测量仪表和继电保护装置的电流线圈；电压互感器作用是将交流高电压变成低电压（100V 或  $100/\sqrt{3}$  V），供电给测量仪表和继电保护装置的电压线圈。它们使测量仪表和保护装置标准化和小型化，使测量仪表和保护装置等二次设备与高压部分隔离，且互感器二次侧均接地，从而保证设备和人身安全。

### **(七) 防御过电压设备**

1. 避雷线（架空线路）。避雷线可将雷电流引入大地，保护输电线路免受雷击。

2. 避雷器。避雷器可防止雷电过电压及内过电压对电气设备的危害。

3. 避雷针。避雷针可防止雷电直接击中配电装置的电气设备或建筑物。

### **(八) 绝缘子**

绝缘子用来支持和固定载流导体，并使载流导体与地绝缘，或使装置不同电位的载流导体间绝缘。

### **(九) 接地装置**

接地装置用来保护电力系统正常工作或保护人身安全。前者称工作接地，后者称保护接地。

### 【例题实战】

1.变、配电所一次主接线中所用的电气设备，称为（ ）。

- A.一次设备                      B.二次设备  
C.远动设备                      D.通信设备

2.可限制短路电流的电器（ ）。

- A.断路器      B.隔离开关                      C.负荷开关                      D.电抗器

3.下列元件不属于一次设备的是（ ）。

- A.发电机      B.变压器      C.电压互感器      D.电抗器

### 【答案解析】

1.【答案】A。解析：由一次设备按照一定规律连接而构成的电路称为一次接线。也称为电气主接线或者一次系统。

2.【答案】D。解析：短路器可用来接通或断开电路的正常工作电流、过负荷电流或短路电流。隔离开关用来在检修设备时隔离电压，进行电路的切换操作及接通或断开小电流电路。负荷开关能切断额定负荷电流和一定的过载电流，但不能切断短路电流。电抗器用来限制短路电流，使发电厂或变电所能选择轻型电器。

3.【答案】C。解析：一次设备包括：1、生产和转换电能的设备：同步发电机、变压器、电动机；2、开关电器：断路器、隔离开关、熔断器；3、限流电器；4、载流导体：母线、架空线路和电缆线；5、补偿设备：调相机、电力电容器、消弧线圈、并联电抗器；6、仪用互感器：电流互感器、电压互感器；7、防御过电压设备：避雷线、避雷器、避雷针；8、绝缘子；9、接地装置。

## 核心知识 2 电弧的形成与熄灭

### （一）电弧

1.电弧产生条件

电弧是一种气体游离放电现象，用开关电器开断电源电压大于10~20V，电流大于80~100mA的电路时，在开关的动静触头分离瞬间，触头就会产生电弧。

2.电弧特点

能量集中，温度很高，亮度很强；电弧是良导体，维持电弧稳定燃烧的电压很低；电弧的质量很轻，在气体或电动力的作用下，很容易移动变形等。

电弧在工业上有很多有益的应用，例如，利用其高温的电弧焊接机、电弧炼钢炉等。但在开关电器中，电弧是有害的，要求尽快地熄灭，否则会对电力设备的正常操作和安全运行带来不利影响。

## **(二) 电弧的产生、维持与熄灭**

### **1. 电弧的产生与维持**

阴极发射电子：热电子发射发射、强电场电子发射；

碰撞游离（主要形式）：阴极表面发射出的电子和弧隙中原有的少数电子在电场作用下，向阳极方向运动，不断地与其它粒子发生碰撞。当电子获得的运动速度 $v$ 足够高，电子的动能大于原子或分子的游离能，则在电子与气体分子或原子碰撞时，就可使束缚在原子核周围的电子释放出来，形成自由电子和正离子，这种现象，就称为碰撞游离。碰撞游离连续进行就可能导致在触头间充满了电子和离子，它具有很大的电导，在外加电压作用下，触头间介质可能被击穿而形成电弧。

热游离：电弧形成后，触头间导电性能增强，弧隙电压降低，电源不断输送能量，温度升高，气体的不规则热运动速度增加。具有足够动能的中性质点互相碰撞时，又可能游离出电子和正离子，这种现象称为热游离。介质产生热游离使电弧持续燃烧，热游离是电弧自持燃烧的主要原因。

### **2. 电弧中的去游离**

电弧中的去游离过程：在电弧中，发生游离过程的同时还进行着使带电质点减少的去游离过程。因此，要想使电弧熄灭，就必须设法加强去游离过程，使其大于游离过程。去游离主要形式为复合和扩散。

## **(三) 交流电弧的特性**

### **1. 电弧温度随时间变化**

电弧电流数值随时间变动，电弧的功率也随电弧电流变动。电弧功率增大时，电弧的温度增加；反过来，当电弧功率减小时，电弧的温度降低。

### **2. 电弧有热惯性**

电弧的温度跟不上电流的变化，存在一个滞后过程。

### **3. 交流电弧每半周自动熄灭一次**

随着交流电流的周期性变化，电弧电流每隔半周过零一次。

在电弧电流自然过零前后，电源向弧隙输送的能量较少，电弧温度和热游离下降，而去游离作用继续进行，电弧将自然熄灭。

#### **(四) 交流电弧的熄灭条件**

在交流电流过零时，电弧将自动熄灭，但不等于最终熄灭。

在交流电弧自动熄灭后，弧隙中存在两个恢复过程：弧隙介质强度恢复过程和弧隙电压恢复过程。弧隙介质强度恢复过程指的是弧隙中介质强度恢复到绝缘的正常状态的过程，弧隙电压恢复过程指的是弧隙电压由熄弧电压逐渐恢复到电源电压的过程。

如果弧隙电压高于介质强度耐受电压，则弧隙就被击穿，电弧重燃。如果弧隙电压低于介质强度耐受电压，则电弧不再重燃，即最终熄灭。

可见，断路器开断交流电路时，电弧熄灭的条件应为：介质强度耐受电压大于弧隙电压或者弧隙介质强度恢复速度快于弧隙电压的恢复速度。

#### **(五) 熄灭交流电弧的基本方法**

##### **1. 利用灭弧能力强的灭弧介质**

常用的灭弧介质有：绝缘油、六氟化硫（SF<sub>6</sub>）气体、真空、压缩空气等。

##### **2. 采用特殊金属材料作灭弧触头**

电弧中的去游离强度，在很大程度上与触头材料有关。常用的触头材料有铜、钨合金、银等，在电弧高温下不易熔化和蒸发，有较高的抗电弧、抗熔焊能力，可以减少热电子发射和金属蒸汽，抑制游离作用。

##### **3. 利用气体或油吹动电弧**

高压断路器中利用各种预先设计好的灭弧室，使气体或油在电弧高温下产生巨大压力，并利用喷嘴形成强烈吹弧。这个方法既起到对流换热、强烈冷却弧隙的作用，又起到部分取代原弧隙中游离气体或高温气体的作用。电弧被拉长、冷却变细，复合加强，同时吹弧也利于扩散，最终使电弧熄灭。

吹弧方式有纵吹和横吹两种，如图所示。吹动方向与电弧弧柱轴线平行称纵吹，主要是使电弧冷却、变细，最终熄灭。吹动方向与电弧弧柱轴线垂直称横吹，是把电弧拉长，表面积增大，冷却加强，熄弧效果好。在高压断路器中常采用纵、横吹混合吹弧方式，熄弧效果更好。

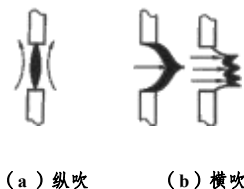


图 2-1 吹弧方式

#### 4. 采用多断口熄弧

为提高断路器的灭弧能力，有些电压等级较高的断路器采用多个灭弧室串联的多断口灭弧方式。多断口将电弧分割成多段，在相同触头行程下，使电弧的总长度加长，去游离作用加强且分离速度加快，弧隙电阻迅速增大，介质强度恢复速度加快。另外，每个断口上的恢复电压减小的倍数为断口数，降低了恢复电压的上升速度和幅值，提高了灭弧能力。

采用多断口的断路器，由于连接两断口的导电部分对地分布电容的影响，断路器在开断位置时，各断口上的电压分配不均匀，影响断路器的灭弧。

高压断路器常制成每相有两个以上的串联断口，以利于灭弧。采用多断口，以降低触头间电压，由于加在每个断口上的电压降低，使电弧易于熄灭。

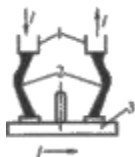


图 2-2 多断口灭弧

#### 5. 拉长电弧并增大断路器触头的分离速度

当交流电流经过零值的瞬间，拉大触头间距离，当触头间所加电压不足以击穿其间距时，电弧就不会重新点燃。触头的分离速度越快，电弧熄灭就越快，通常在高压断路器中装设强力分闸弹簧来加快触头分开的速度。如 SN-10 型少油断路器，装有 4



条分闸弹簧，用于分闸时迅速拉长电弧，以提高弧隙介电强度的恢复速度和电流过零时介电强度初始值。

### 【例题实战】

1. 电弧的形成主要是（ ）所致。  
A. 热游离      B. 碰撞游离      C. 表面游离      D. 光游离
2. 电弧燃烧过程中，游离和去游离相互平衡，电弧将（ ）。  
A. 自然熄灭      B. 稳定燃烧      C. 不会产生
3. 触头两端交流电压过零时，触头间的电弧将（ ）。  
A. 温度扩散      B. 稳定燃烧  
C. 自然熄灭      D. 扩散去游离

### 【答案解析】

1. 【答案】B。
2. 【答案】B。
3. 【答案】C。解析：交流电弧，特别是过零值的自然暂时熄灭，对采取措施加强去游离，以使在下半周电弧不会重燃而最终熄灭尤为重要。

## 核心知识点 3 单母线分段接线

### （一）单母线分段不带旁路接线

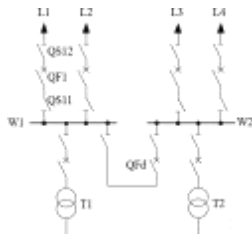


图 3-1 单母线分段不带旁路接线

### 1.母线分段的作用

减少母线故障或检修时的停电范围。

### 2.优缺点

优点：同单母线不分段接线，除此之外，缩小了母线故障或检修时的停电范围（可靠性有所提高），还可以并列运行，也可以分列运行（灵活性有所提高）。

缺点：

任一段母线故障或检修期间，该段母线上的所有回路均需停电；

任何一条出线断路器故障或检修时，会中断该回路的供电。

### 3.适用范围

发电厂厂用电接线通常采用单母线分段接线方式，即广泛应用于中小容量发电厂和变电站6~10kV接线中。

(1) 6~10kV 配电装置，出线回路数为6回及以上时；发电机电压配电装置，每段母线上的发电机容量为12MW及以下时。

(2) 5~63kV 配电装置，出线回路数为4~8回。

(3) 110~220kV 配电装置，出线回路数为3~4回。

## (二) 单母线带旁路母线接线

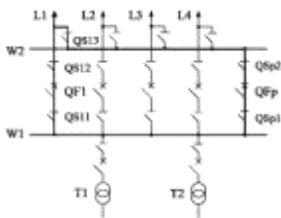


图 3-2 单母线带旁路母线接线

### 1.旁路母线的的作用

检修出线断路器时，可以不中断该回路的供电。

### 2.优缺点

优点：同单母线不分段接线，除此之外，断路器检修时所在回路不停电（可靠性有所提高）。

缺点：母线故障或检修时，全部停电；调度不方便。

### 【例题实战】

1 采用单母线分段的主接线，当分段断路器闭合运行时，如果某段母线上发生故障，继电保护动作首先跳开（ ）。

- A. 出线断路器                      B. 分段断路器  
C. 电源支路断路器                D. 该故障分段母线上的所有断路器

2. 主接线中，旁路母线的作用是（ ）。

- A. 作备用母线  
B. 不停电检修出线断路器  
C. 不停电检修母线隔离开关  
D. 母线或母线隔离开关故障时，可以减少停电范围

3. 单母线分段的主要目的是（ ）。

- A. 提高供电可靠性                B. 出线断路器检修时可以不停电  
C. 母线故障时可以保证供电可靠性    D. 不受故障影响

### 【答案解析】

1. 【答案】B。解析：单母线分段的主接线，如果某段母线上发生故障，继电保护动作首先跳开分段断路器，缩小故障范围。

2. 【答案】B。解析：如果要求检修断路器不中断该回路的供电，可以装设旁路母线和旁路断路器，这种接线广泛用于出线较多的100kV及以上的高压配电装置中。

3. 【答案】A。解析：母线分段的作用：减少母线故障或检修时的停电范围，提高供电可靠性。

## 核心知识点 4 无汇流母线的主接线

### （一）单元接线

单元接线是无母线接线中最简单的形式，也是所有主接线基本形式中最简单的一种。

发电机与变压器直接连接组成单元接线。

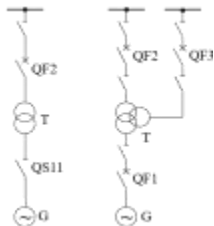


图 4-1 单元接线

#### 1.单元接线的优点

- (1) 接线简单，开关设备少，操作简单。
- (2) 低压侧短路时，短路电流相对于具有发电机电压级母线时有所减小。
- (3) 故障可能性小，可靠性高。
- (4) 占地少，投资节省。

#### 2.单元接线的缺点

单元中任一元件故障或检修都会影响整个单元的工作。

#### 3.单元接线的应用

单元接线一般用于下述情况：

发电机额定电压超过10kV（单机容量在125MW及以上）；

虽然发电机额定电压不超过10kV，但发电厂无地区负荷；

原接于发电机电压母线的发电机已能满足该电压级地区负荷的需要；

原接于发电机电压母线的发电机总容量已经较大（6kV 配电装置不能超过120MW，10kV 配电装置不能超过240MW）。

### (二) 桥形接线

当只有两台变压器和两条线路时，常采用桥形接线，桥形接线分为内桥接线和外桥接线。内桥接线的桥连断路器在线路断路器之内，外桥接线的桥连断路器在线路断路器之外。

内桥接线在线路故障或切除、投入时，不影响其余回路工作，并且操作简单；而在变压器故障或切除、投入时，要使相应线路短时停电且操作复杂。因此，内桥接线适用于出线线路较长，主变压器不需要经常投切的场合。

外桥接线在运行中的特点与内桥接线相反，外桥接线适用于出线线路较短，主变压器需要经常投切的场合。

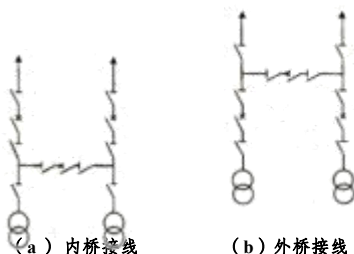


图 4-2 桥式接线

### (三) 角形接线

角形接线的角数等于断路器数，也等于进出线总回路数。

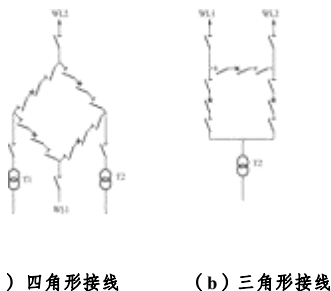


图 4-3 角形接线

### 1.角形接线的优点

(1) 所用的断路器数目比单母线分段接线或双母线接线还少 1 台, 却具有双母线接线的可靠性, 任一断路器检修时, 只需断开其两侧的隔离开关, 不会引起任何回路停电。

(2) 没有母线, 因而不存在因母线故障所产生的影响。

(3) 操作方便, 所有隔离开关, 只用于检修时隔离电源, 不作操作之用, 不会发生带负荷断开隔离开关的事故。

### 2.角形接线的缺点

(1) 角形中任一断路器检修时, 变开环运行, 降级接线的可靠性。

(2) 在开环的情况下, 当某条回路故障时影响别的回路工作。

(3) 角形接线在开、闭环两种状态的电流差别很大, 可能使设备选择发生困难, 继电保护复杂化。

(4) 不利于扩建。

### 3.适用范围

角形接线多用于最终规模明确, 进、出线为 3~5 回的 110kV 及以上的配电装置中。

### 【例题实战】

1. 发电机与变压器直接连接、中间不设母线的接线方式称为 ( )。

- A. 单母线接线                      B. 单母线分段接线  
C. 桥形接线                        D. 单元接线

2. 内桥形式主接线适用于 ( )。

- A. 出线多, 变压器操作少              B. 出线多, 变压器操作多  
C. 出线少, 变压器操作多              D. 出线少, 变压器操作少

3. 在 110kV 及以上的配电装置中, 下列哪种条件下可采用多角形接线 ( )。

- A. 出线不多且发展规模不明确              B. 出线不多但发展规模明确  
C. 出线多但发展规模不明确              D. 出线多且发展规模明确

### 【答案解析】

1. 【答案】D。

2. 【答案】D。解析：内桥接线在线路故障或者投入、切除时，不影响其余回路工作，并且操作简单；而变压器故障切入、投入时，要使相应线路短路时停电且操作复杂。因而该线路一般适用于线路较长（相对来说线路的故障概率较大）和变压器不需要经常切换的情况。外桥接线在运行中的特点与内桥接线相反，适用于线路较短和变压器需要经常切换的情况。

3. 【答案】B。解析：角形接线多用于最终规模较明确，进、出线数为3~5回的110kV及以上的配电装置中（例如水电厂及无扩建要求的变电所等）。

## 核心知识点 5 电气设备选择的一般条件

### （一）按正常工作条件选择电气设备

#### 1. 额定电压

使电气设备可靠性工作的正常电压要求是：电气设备所在回路的最高运行电压不得高于电气设备的允许最高工作电压。由于电气设备的允许最高工作电压为其额定电压 $U_N$ 的1.1~1.15倍，而因电力系统负荷变化和调压等引起的电网最高运行电压不超过电网额定电压 $U_N$ 的1.1倍，所以一般可以按电气设备的额定电压 $U_N$ 不得低于其在电网的额定电压 $U_{Ns}$ 的条件来选择电气设备，即由 $(1.1 \sim 1.15) U_N > 1.1 U_{Ns}$ 可得

$$U_N > U_{Ns}$$

电气设备装设地点的环境条件和海拔影响其绝缘性能，随装设地点海拔的增加，空气密度和湿度相应减小，使得电气设备外部空气间隙和固体绝缘外表面的放电特性降低，电气设备允许最高工作电压减小。当海拔在1000~4000m时，海拔每增高100m，最高工作电压应下降1%。对海拔超过1000m的地区，一般应选用高原产品或外绝缘提高一级的产品。对于现有110kV及以下大多数电器的外绝缘有一定裕度，可在海拔2000m以下地区使用。在空气污秽或有冰雪的地区，某些电气设备应选用绝缘加强型或高一级电压的产品。

电网的最高运行电压：

(1) 220kV及以下为 $1.15U_N$ ；

(2) 330kV及以上为 $1.1U_N$ 。

电气设备的最高允许电压为设备额定电压的1.1~1.15倍。

## 2. 额定电流

电气设备的额定电流  $I_N$  是指其在额定环境温度  $\theta_0$  下的长期允许电流。为了满足长期发热条件，应按额定电流  $I_N$  不得小于所在回路最大持续工作电流  $I_{\max}$  的条件进行选择，即

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

式中—— $I_N$  是指在额定环境温度下，电气设备的长期允许电流。

$I_{\max}$  为电气设备所在回路的最大持续工作电流。

回路最大持续工作电流根据发电机、调相机变压器容量和负荷按表的原则确定。

我国生产的电气设备额定环境温度  $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$ ，在  $40\sim 60^\circ\text{C}$  范围内，当实际环境温度高于  $40^\circ\text{C}$  时，环境温度每增高  $1^\circ\text{C}$ ，建议按减少额定电流 1.8% 进行修正；当实际环境温度低于  $40^\circ\text{C}$  时，环境温度每降低  $1^\circ\text{C}$ ，建议增加额定电流 0.5% 进行修正，但其最大过负荷不得超过额定电流的 20%。

## (二) 按短路条件校验热稳定和动稳定

### 1. 短路热稳定校验

热稳定是指电气设备承受短路电流热效应而不损坏的能力。热稳定校验的实质是使电气设备承受短路电流热效应时的短时发热最高温度不超过短时最高允许温度。由于电器使用的导体截面和材料为已知，它所能承受的最大短路电流热效应为已知，故电器的热稳定电流及其通过时间来决定的，满足热稳定的条件为：

$$I_t^2 t \geq Q_k$$

$I_t$ 、 $t$  分别为电气设备允许通过的热稳定电流和时间；

$Q_k$  为短路电流产生的热效应。

### 2. 电动力稳定校验—动稳定校验

动稳定是指电气设备承受短路电流产生的电动力效应而不损坏的能力。部分电气设备动稳定按应力和电动力校验。电器满足动稳定的条件为：

$$i_{es} \geq i_{sh} \text{ 或 } I_{es} \geq I_{sh}$$

$i_{sh}$ 、 $I_{sh}$ —短路冲击电流幅值及其有效值， $i_{sh} = \sqrt{2} K_{sh} I''$ ，其中， $I''$  为 0s 短路电流周期分量有效值； $K_{sh}$  为冲击系数，发电机端取 1.9，发电厂高压母线及发电机电压电抗器后取 1.85，远离发电机时取 1.8；



$i_{es}$ 、 $I_{es}$ —制造厂家给出的电器允许通过的动稳定电流幅值和有效值，制造厂家用此电流表示电器的动稳定特性（由于电器的结构，使用的导体材料和截面为已知，它所承受的最大电动力为已知，因此将最大电动力转化为动稳定电流校验动稳定更方便），在此电流作用下电器能继续正常工作而不发生机械损坏。

### 【例题实战】

1. 电气设备额定电压的选择条件是它的值要大于等于（ ）。  
A. 所处电网的额定电压                      B. 所处电网的最高工作电压  
C. 所处电网额定电压的 1.1 倍              D. 所处电网额定电压的 1.15 倍
2. 电气设备选择的一般条件是，按（ ）选择额定电压和额定电流，按（ ）校验热稳定和动稳定。  
A. 正常工作条件    短路条件              B. 短路条件    正常工作条件  
C. 正常工作条件    正常工作条件              D. 短路条件    短路条件
3. 电气设备额定电流的选择条件是它的值要大于等于（ ）。  
A. 短时最大工作电流                      B. 最大持续工作电流  
C. 最大短路电流                              D. 持续短路电流

### 【答案解析】

1. 【答案】A。  
2. 【答案】A。解析：要保证电气设备可靠地工作，必须按正常工作条件选择，并按短路情况校验其热稳定和动稳定。
3. 【答案】B。解析：电气设备按照正常工作条件进行选择条件：（1） $U_N \geq U_{NS}$ ；（2） $I_N \geq I_{max}$ ；（3）考虑环境条件。

## 核心知识点 6 配电装置的最小安全净距

为了满足配电装置运行和检修的需要，各带电设备之间应相隔一定的距离。

### （一）最小安全净距的定义

最小安全净距是指在这一距离下，无论在正常最高工作电压或出现内、外过电压时，都不致使空气间隙被击穿。

对于敞露在空气中的屋内、外配电装置中各有关部分之间的最小安全净距分为A、B、C、D、E 五类。其中A 值是最基本的，而B、C、D、E 是在A 值的基础上在考虑运行维护、设备移动、检修工具活动范围、施工误差等具体情况而确定的。

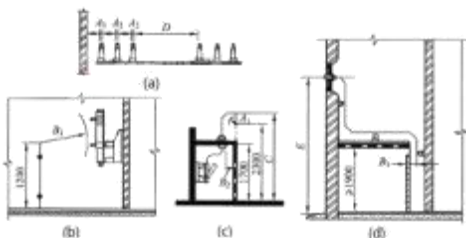


图 6-1 屋内配电装置安全净距校验图

## (二) 几个最小安全净距参数

### 1.A 值

A 值是根据过电压与绝缘配合计算，并根据间隙放电试验曲线来确定的，空气间隙在耐受不同形式的电压时，具有不同的电气强度，即 A 值不同。一般地说，220kV 及以下的配电装置，大气过电压（雷击或雷电感应引起的过电压）起主要作用；330kV 及以上的配电装置，内部过电压（开关操作、故障、谐振等引起的过电压）起主要作用。另外，空气的绝缘强度随海拔的升高而下降，当海拔超过 1000 米时，按每升高 100m 绝缘强度增加 1%来增加 A 值。

A 值分为  $A_1$  和  $A_2$  两项。

- (1)  $A_1$ ：带电部分至接地部分之间的最小电气净距；
- (2)  $A_2$ ：不同相的带电导体之间的最小电气净距。

### 2.B 值

B 值分为  $B_1$  和  $B_2$  两项。

- (2)  $B_1$ ：带电部分至栅状遮栏之间的距离和可移动设备的外廓在移动中至带电裸导体间的距离，即

$$B_1 = A_1 + 750 \text{ (mm)}$$

750mm 是考虑运行人员手臂误入栅栏时手臂的长度，设备移动时的摆动也在 750mm 范围内，当导线垂直交叉且又要求不同时停电检修的情况下，检修人员在导线上下活动范围也不超过 750mm。

(2)  $B_2$ ：带电部分至网状遮栏之间的电气净距，即

$$B_2 = A_1 + 70 + 30 \text{ (mm)}$$

70mm 是考虑运行人员的手指误入网状遮栏时的手指长度，30mm 是考虑施工误差。

当为板状遮栏时， $B_2 = A_1 + 30 \text{ (mm)}$ 。

### 3.C 值

C 值：无遮栏裸导体至地面的垂直净距。

保证人举手后，手与带电裸导体间的距离不小于  $A_1$  值，即

$$C = A_1 + 2300 + 200 \text{ (mm)}$$

2300mm 是考虑运行人员举手后的总高度，200mm 是屋外配电装置在垂直方向上的施工无差。

对于屋内配电装置，不考虑施工误差，即： $C = A_1 + 2300 \text{ (mm)}$ 。

### 4.D 值

D 值：不同时停电检修的平行无遮栏裸导体之间的水平净距。

$$D = A_1 + 1800 + 200 \text{ (mm)}$$

1800mm 是考虑检修人员和工具的允许活动范围，200mm 是考虑屋外条件较差而取的裕度。

对屋内配电装置，不考虑此裕度，即： $D = A_1 + 1800 \text{ (mm)}$ 。

### (5) E 值

E 值：屋内配电装置通向屋外的出线套管中心线至屋外通道路面的距离。

(1) 35kV 及以下，取  $E = 4000\text{mm}$ ；

(2) 60kV 及以上，取  $E = A_1 + 3500 \text{ (mm)}$ ，并取整数值，其中 3500mm 为人站在载重汽车车厢中举手的高度。

## 【例题实战】

1.3 ~ 110kV 屋内配电装置的安全净距中, C 值的适用范围是 ( )。

- A. 不同时停电检修的平行无遮拦裸导体之间的水平净距
- B. 屋内配电装置通向屋外的出现套管中心线至屋外通道路面的距离
- C. 无遮拦裸导体至地(楼)面之间
- D. 网状遮栏至带电部分之间

2. 在某一距离下, 无论在最高电压或出现内外过电压时, 都不至使空气间隙被击穿, 这一距离是指 ( )。

- A. 设备的安全距离    B. 最小安全净距    C. 线路安全净距

3. 10kV 屋内配电装置中, 按规定, 网状遮栏至带电部分之间的安全净距为  $A_1+100\text{mm}$ , 若将网状遮栏改为板状遮栏, 则板状遮栏至带电部分之间的安全净距应为 ( )。(  $A_1$  为  $125\text{mm}$ )

- A.  $155\text{mm}$                       B.  $180\text{mm}$                       C.  $200\text{mm}$                       D.  $220\text{mm}$

### 【答案解析】

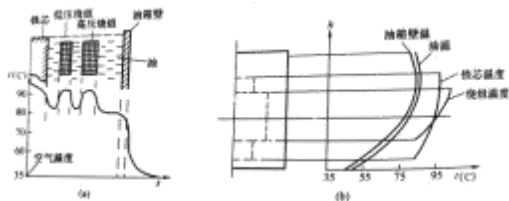
1. 【答案】C。解析: C 值: 无遮拦裸导体至地面的垂直净距。
2. 【答案】B。解析: 最小安全净距的定义是指在某一距离下, 无论在最高电压或出现内外过电压时, 都不至使空气间隙被击穿。用 A 值来表示最小安全净距, A 指与电极的形状、冲击电压的波形、过电压及其保护水平、环境条件以及绝缘配合等因素有关。
3. 【答案】A。解析: 网状遮栏至带电部分之间的安全净距为  $A_1+30=155\text{mm}$ 。

## 核心知识点 7 变压器的发热和冷却

### (一) 发热和冷却过程

变压器在运行过程中, 其绕组和铁芯中的电能损耗(绕组的铜耗和铁芯的铁耗)都转变成热量, 使变压器各部分的温度升高。这些热量以传导、对流和辐射的方式向外扩散。所以, 变压器运行时各部分的温度分布极不均匀。

目前，最普遍采用的是油浸式变压器，变压器油除作为绝缘介质外，还作为散热的媒介，油箱除作为油的容器外，还作为对周围空气的散热面。油浸自冷式变压器各部分的温升分布如图7-1所示。



(a) 沿变压器横截面的温度分布；(b) 沿变压器高度的温度分布

图 7-1 油浸自冷式变压器的温度分布

## (二) 散热过程

1. 热量由铁芯和绕组内部以传导方式传至铁芯和绕组外表面；
2. 热量由铁芯和绕组外表面以对流方式传到变压器油中，约为绕组对空气温升的20%~30%；
3. 铁芯和绕组附加的热油经对流把热量传到油箱、散热器的内表面；
4. 油箱、散热器内表面热量经传导散到外表面；
5. 热量由油箱壁经对流和辐射散到周围空气中，这部分所占比重约为总温升的60%~70%。

## (三) 发热和冷却过程的特点

1. 铁芯、高压绕组、低压绕组的发热只与其本身损耗有关，互不关联，所产生的热量都传给油；
2. 在散热过程中，会引起各部分的温度差别很大。图7-1 (a) 表明，沿变压器横截面的温度分布很不均匀，图7-1 (b) 表明，变压器各部分沿高度方向的温度分布也是不均匀的。就整个变压器而言，绕组上端部的温度最高，最热点在高度方向的70%~75%处，而沿径向则在绕组厚度（自内径算起）的1/3处。
3. 大容量变压器的电能损耗大，单靠箱壁和散热器已不能满足散热要求，所以需采用强迫油循环风冷或强迫油循环水冷，使热油经过强风（水）冷却器冷却后，再用

油泵送回变压器。大容量的电力变压器已普遍采用导向冷却方式，在高低压绕组和铁芯内部设有油路，使进入油箱内的冷油全部通过绕组和铁芯内部流出，这样带走了大量热量，有效的提高散热效率。

### 【例题实战】

- 1.油浸式变压器正常运行时，温度最高的是（ ）。  
A.铁心      B.绕组      C.油      D.油箱表面
- 2.下面是几种油浸式变压器的冷却方式，冷却效果最好的是（ ）。  
A.油浸自冷      B.油浸风冷      C.导向油循环强制风冷
- 3.油浸式变压器的散热过程包括（ ）。（多选）  
A.油绕组和铁芯内部以传导方式传至导体或铁芯表面  
B.由铁芯和绕组表面以对流方式传到变压器油中  
C.绕组和铁芯附近的热油经对流把热量传到油箱或散热器的内表面  
D.油箱或散热器内表面热量经传导散到外表面，然后由油箱壁经对流和辐射散到周围空气中

### 【答案解析】

- 1.【答案】B。解析：就整个变压器而言，绕组上端部的温度最高，最热点在高度方向的70%~75%处，而沿径向在绕组厚度（自内径算起）的1/3处。
- 2.【答案】C。
- 3.【答案】ABCD。解析：散热过程如下：（1）热量由绕组和铁芯内部以传导方式传至导体或铁芯表面，通常为几摄氏度。
- （2）热量由铁芯和绕组表面以对流方式传到变压器油中，约为绕组对空气温升的（20~30）%。
- （3）绕组和铁芯附近的热油经对流把热量传到油箱或散热器的内表面。这部分所占比重不大。
- （4）油箱或散热器内表面热量经传导散到外表面。这部分不会超过（2~3）℃。
- （5）热量由油箱壁经对流和辐射散到周围空气中，这部分所占比重较大，约占总温升的（60%~70%）。