

## 第二章 电网的电流保护

第一节 电流继电器

第二节 单侧电源电网相间短路的电流保护

第三节 电网相间短路的方向性电流保护

第四节 中性点直接接地电网中接地短路的零序电流及方向保护

第五节 中性点非直接接地电网中单相接地故障的零序电压、电流及方向保护



# 第一节 电流继电器

## 一、电流保护基本概念

- **起动电流**：对反应电流升高而动作的电流保护而言，能使继电器起动的**最小电流值**。
- **返回电流**：对反应电流升高而动作的电流保护而言，能使继电器返回到原始状态的**最大电流值**。
- **继电特性**：无论起动和返回，继电器的动作都是明确干脆的，它不可能停留在某一个中间位置，此特性称“继电特性”。



- **系统最大运行方式：**在被保护线路末端发生短路时，系统等值阻抗最小，而通过保护装置短路电流为最大的运行方式。
- **系统最小运行方式：**在同样短路条件下，系统等值阻抗最大，而通过保护装置的短路电流为最小的运行方式。
- **保护装置的整定：**根据对继电保护的基本要求，确定保护装置起动值，灵敏参数，动作时限等过程。



## 二、电流继电器

电流继电器是**实现电流保护**的基本元件，用作测量和起动元件，反应电流超过某一整定值而动作。

以吸引衔铁式电磁型继电器为例，如**图1**所示。



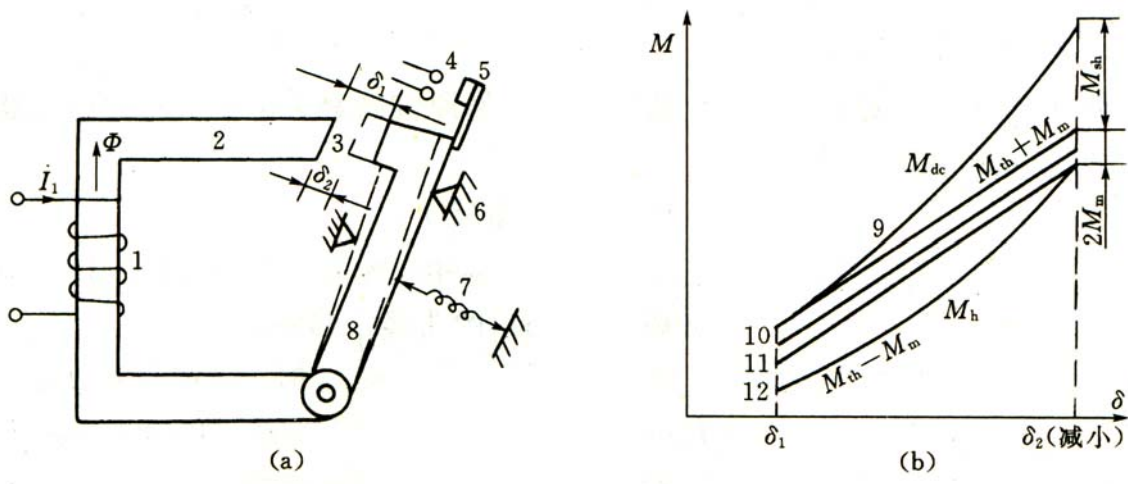


图1 电磁型电流继电器的原理结构和转矩曲线

(a) 原理结构图 (b) 电磁转矩及反作用转矩与舌片行程的关系

- 1. 线圈; 2. 铁心; 3. 空气隙; 4. 固定触点; 5. 可动触点; 6. 止档;
- 7. 弹簧; 8. 被吸引的可动舌片; 9. 起动电磁转矩; 10. 起动时的反作用转矩;
- 11. 返回时的反作用转矩; 12. 返回时的电磁转矩



继电器动作后，  
当电流减小使  $I_J \leq I_{h.J}$   
时，继电器又立即返  
回原位，触点打开。

无论起动和返  
回，继电器的动作都  
是明确干脆的，不可  
能停留在某一个中间  
位置，这种特性称为  
“**继电特性**”。如**图2**所  
示。

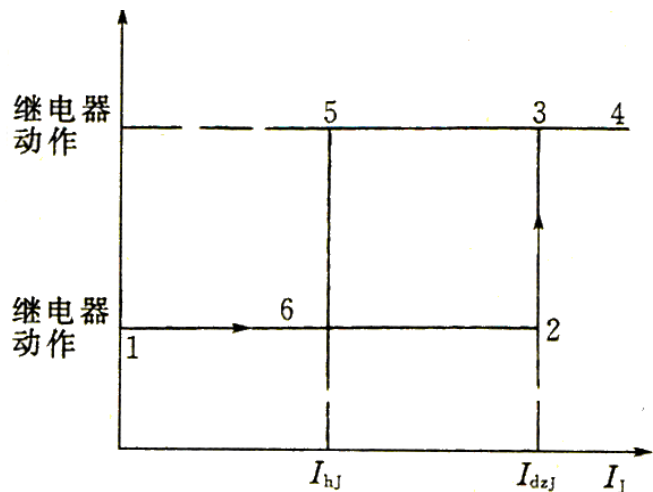


图2 继电器的“继电特性”



**返回系数：**返回电流与起动电流的比值称继电器的返回系数，

$$K_h = \frac{I_{h.J}}{I_{dz.J}}$$

受行程末端剩余转矩及摩擦转矩的影响，电磁型过电流继电器返回系数**恒小于1**。

**动作电流的调整方法：**

- 改变继电器线圈的匝数；
- 改变弹簧的张力；
- 改变初始空气隙的长度。

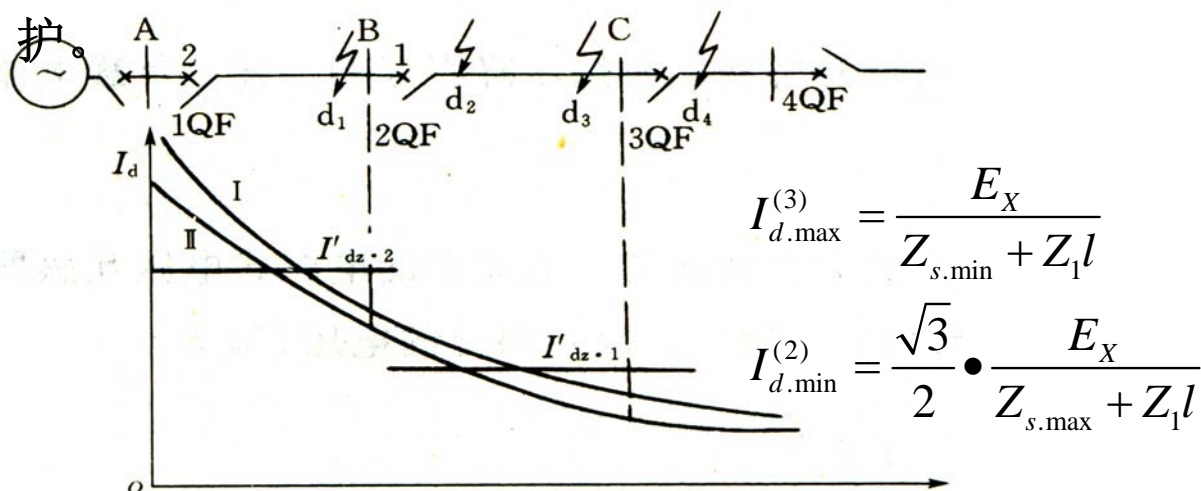


## 第二节 单侧电源网络相间短路的电流保护

### 一、无时限电流速断保护(电流 I 段)

#### (1) 保护原理

反应**电流增大**而瞬时动作切除故障的电流保

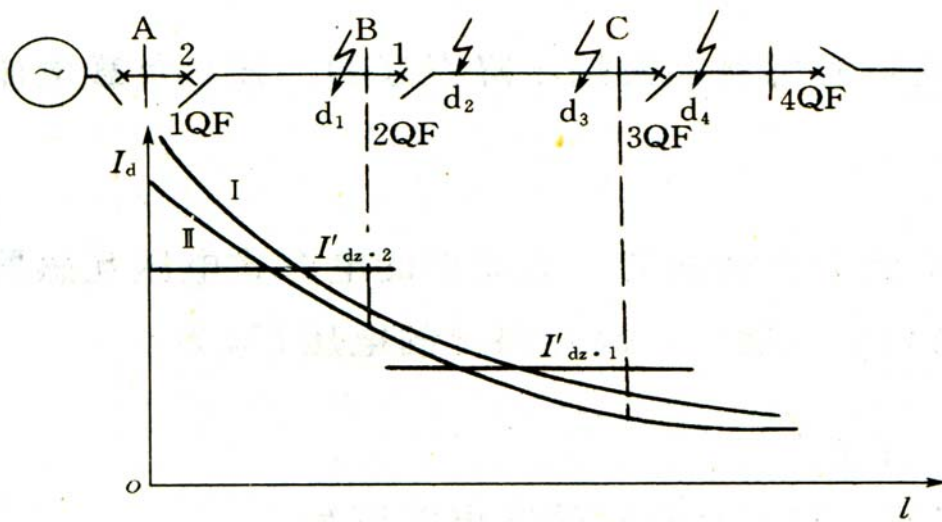


短路点距保护安装地点**愈远**，流过安装地点的**短路电流愈小**。

西南交通大学







希望：全线速断

矛盾：选择性与速动性（母线前后短路电流相同）

问题1：如何解决？



### 解决问题的方法：

①**优先保证选择性**：保证在下一条线路出口处短路时不起动，称为，按躲开下一条线路出口短路的条件整定；

②**优先保证速动性**：采用无选择性的速断保护切除故障，再用**自动重合闸**装置纠正。



## (2)整定计算

①**动作电流**：为保证选择性，保护装置起动电流应按躲开下一段线路出口处（如 $d_2$ 点即变电所B）短路时，通过保护的**最大短路电流**（最大运行方式下的三相短路电流）整定。即

$$I'_{dz.1} > I_{d.d4.max} = K'_K I_{d.c.max}^{(3)}$$

可靠系数  $K'_K = 1.2 \sim 1.3$ 。

②**保护范围（灵敏度  $K_{Lm}$ ）**：计算（校验）最小运行方式下，速断保护范围的相对值

$$L_b \% > (15\% \sim 20\%)$$

$$L_b \% = \frac{L_{\min}}{L_{AB}} \times 100\% \geq (15\% \sim 20\%)$$

西南交通大学



$$I'_{dz.1} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_X}{Z_{s.max} + Z_1 l_{min.1}}$$

$$l_{min.1} = \frac{1}{Z_1} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E_X}{I'_{dz.1}} - Z_{s.max} \right)$$

$$= \frac{1}{Z_1} \left( \frac{U_e}{2I'_{dz.1}} - Z_{s.max} \right)$$

$$l_{min} = \frac{1}{Z_1} \left( \frac{U_e}{2I'_{dz}} - Z_{s.max} \right)$$

通用：

问题2：灵敏度不能满足要求怎么办？——选用其他原理的保护

最大运行方式三相短路时保护范围最大，最小运行方式两相短路时保护范围最小。

西南交通大学



### ③动作时限

一般不设时限，仅为继电器的固有动作时限。**(特例：牵引供电系统0.1S)**

### (3)评价

优点：简单可靠，动作迅速

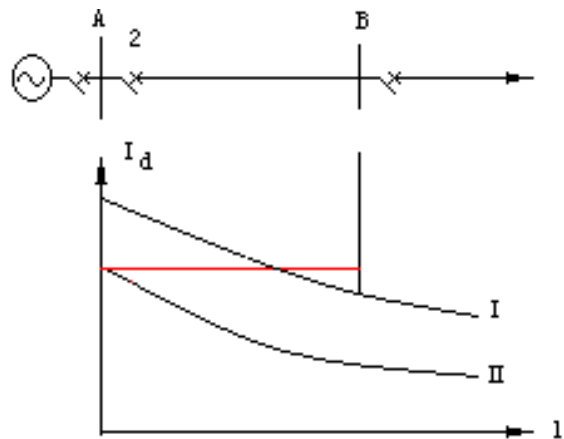
缺点：

✓不能保护线路全长

(? —限时电流速断保护)

✓运行方式变化较大时，可能无保护范围

(? —阻抗保护不受运行方式影响)

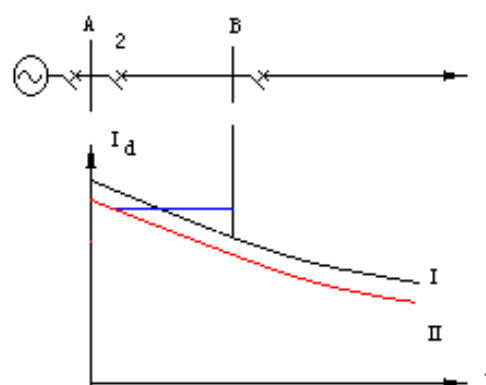
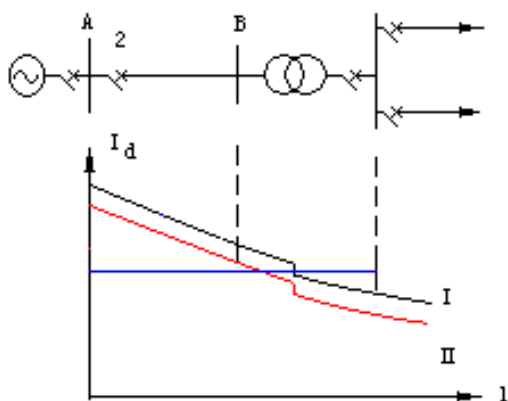
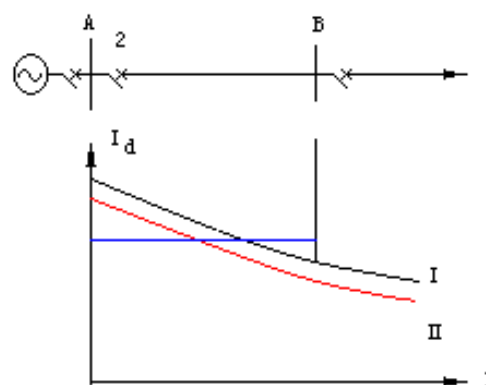


西南交通大学



✓ 线路较短时，可能  
无保护范围  
(? —纵联差动保护)

✓ 特殊情况，能保护  
线路全长




## 二、 限时电流速断保护（电流Ⅱ段）

### (1)工作原理

有选择性的电流速断保护不能保护线路全长，增加一段新的保护，切除本线路速断保护以外的故障，同时作为速断保护的后备——限时电流速断保护

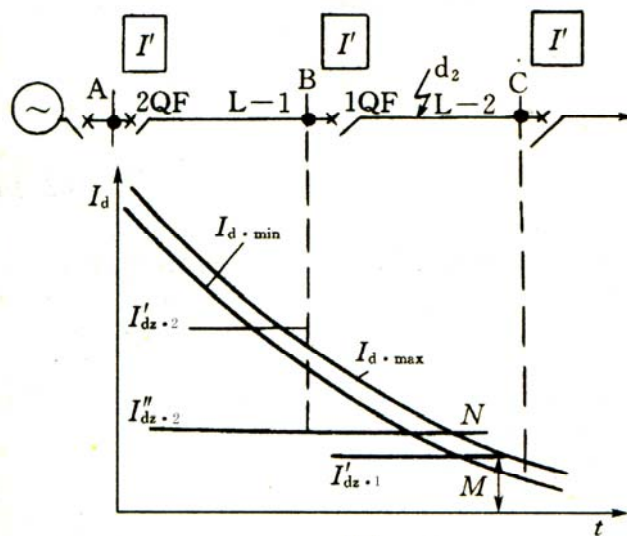
#### 要求：

- 保护线路全长
- 具有足够灵敏度       通过整定计算保证
- 最小动作时限

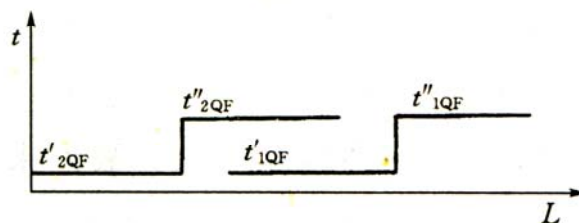


## (2) 整定原则

- **保护线路全长**：限时电流速断保护的**保护范围**必须延伸到下一条线路中去，这样当下一条线路出口处短路时，它就能切除故障
- **保证选择性**：限时电流速断保护的**动作**必须带有**时限**



(a)



(b)

西南交通大学





以保护2为例:

$$I'_{dz.1} < I''_{dz.2} < I_{d.B.min}$$



保证选择性  
的需要

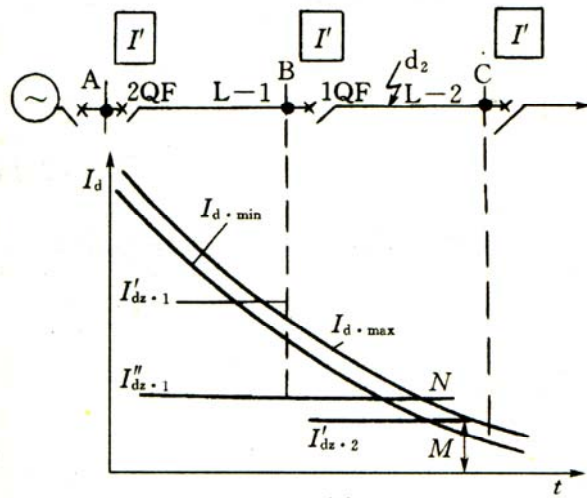


保护全长  
的需要

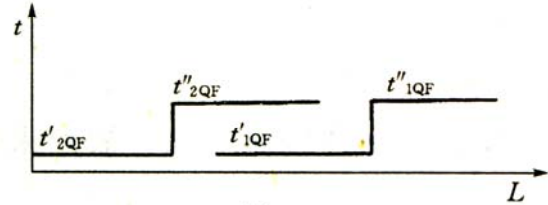
①动作电流

$$I''_{dz.2} = K_K'' I'_{dz.1}$$

$$K_K'' \text{ 取 } 1.1 \sim 1.2$$



(a)



(b)

西南交通大学



## ②动作时限

为了保证选择性，限时电流速断保护比下一条线路无时限电流速断保护的動作时限要高出一个时间阶段

$$t_2'' = t_1' + \Delta t$$

$\Delta t$  一般取0.35—0.6S

当线路上装设了电流速断和限时电流速断保护以后，它们联合工作就可以在0.5s内切除全线路范围内的故障，且能满足速动性的要求，具有该作用的保护称线路的主保护。即无时限电流速断和限时电流速断构成线路的“主保护”。



### ③灵敏度校验

灵敏度是指保护装置在它的保护范围内发生故障和不正常运行状态时，保护装置的反应能力。其高低用灵敏系数来衡量。灵敏度系数定义为：

$$K_{lm} = \frac{\text{保护范围末端金属性短路时故障参数的最小值}}{\text{保护装置动作参数的整定值}} > 1$$

限时电流速断保护灵敏度为：

$$K_{lm} = \frac{I_{d.\min}^{(2)}}{I_{dz}''} \geq 1.5$$

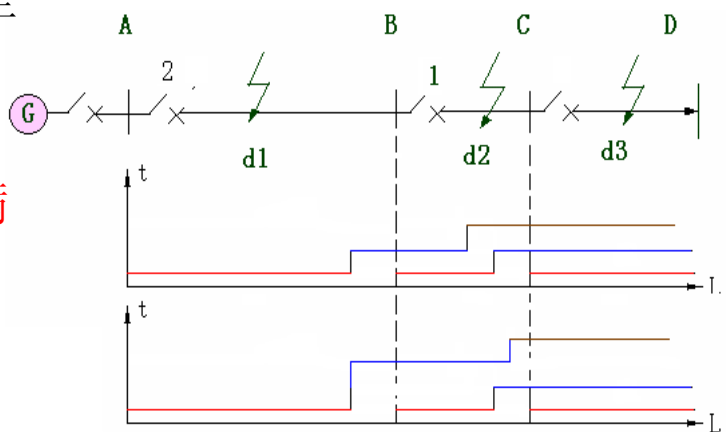
$I_{d.\min}^{(2)}$  为被保护线路末端两相短路时流过限时电流速断保护的最小短路电流。



由于限时电流速断保护的重要性，进行灵敏度效验时条件苛刻是因为：

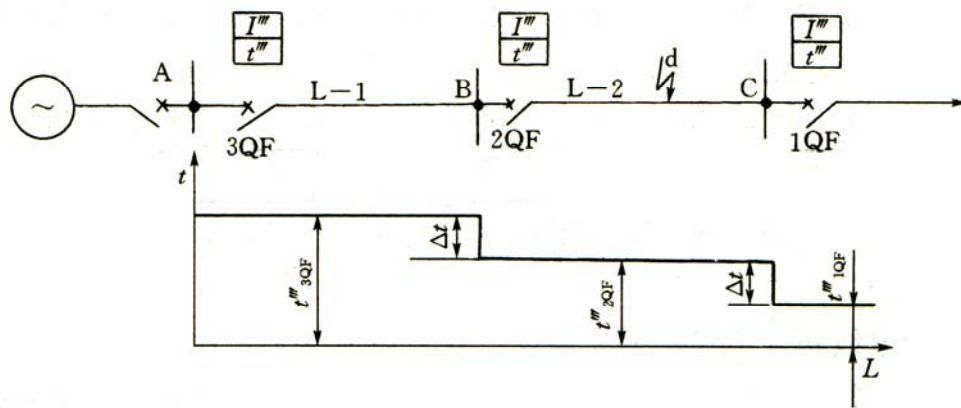
- 绝大多数故障为非金属性故障— $I_d$ 减小
- 实际短路电流小于计算电流
- 电流互感器负误差
- 起动电流正误差

问题3：灵敏度不能满足要求怎么办？——  
与下一条线路的限时  
电流速断保护配合



### 三、定时限过电流保护（电流III段）

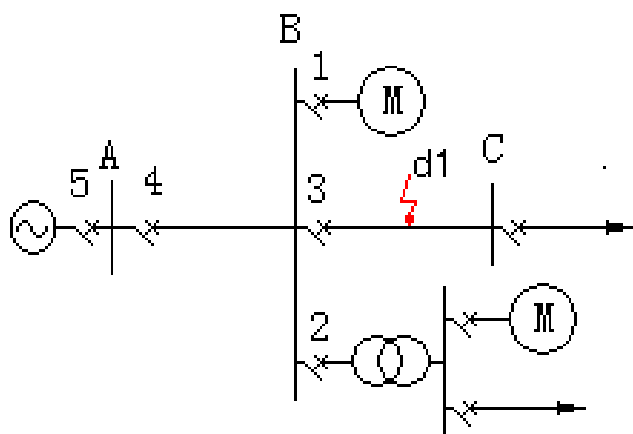
起动电流按照躲开**最大负荷电流**来整定，正常时不应该起动，在电网发生故障时，能反应于电流的增大而动作，一般情况下，不仅能保护本线路的全长，也能保护相邻线路的全长，起到后备保护的作用。



## (1)工作原理与整定原则

过电流保护在最大负荷时，保护不应动作。

在d1点发生故障时，短路电流将流过保护3、4、5，都启动，按选择性要求，保护3动作切除故障，保护4、5由于电流减小而立即返回。



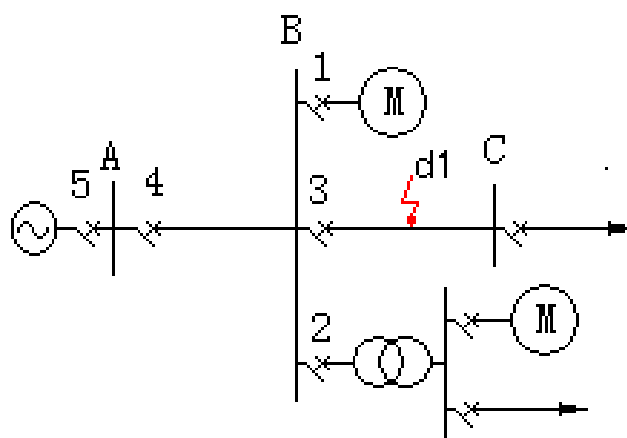
问题：保护4、5能否立即返回呢？

西南交通大学



当外部故障切除后，  
流经保护4的电流仍然是继续运行的负荷电流。

短路 → 母线B电压降低 → 电动机制动 → 故障切除后，电压恢复，电动机自启动 → 自启动电流要大于正常工作电流。



$$I_{zq.\max} = K_{zq} I_{f.\max}$$

保护4、5在这个电流的作用下必须立即返回，  
即  $I_h > I_{zq.\max}$

$$I_h = K_k^{///} I_{zq.\max} = K_k^{///} K_{zq} I_{f.\max}$$

西南交通大学



①**动作电流** 按躲开被保护线路的最大负荷电流，且在自起动电流下继电器能可靠返回进行整定。

$$I_{dz}^{///} = \frac{I_h}{K_h} = \frac{K_k^{///} K_{zq}}{K_h} I_{f \max}$$

式中， $I_{f \max}$ —被保护线路的最大负荷电流；

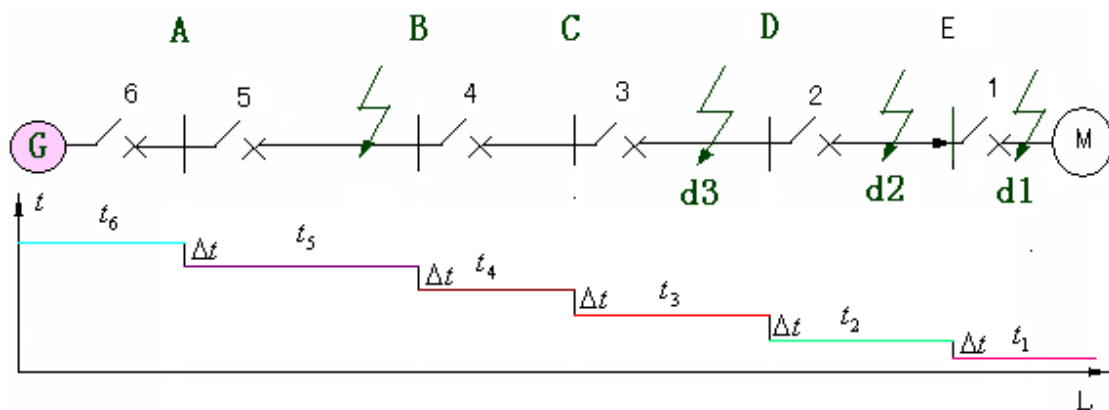
$K_K^{///}$ —可靠系数，一般取1.15~1.25；

$K_{zq}$ —自起动系数，取1~3； $K_h$ —继电器的返回系数。





**②时间整定** 电流III段保护的范围很大，为保证选择性，保护动作延时比下一条线路电流III段的动作时间长  $\Delta t$ ，为



$$t_{k+1}^{///} = t_k^{///} + \Delta t$$

电流越大，动作时间越长 →  
电流速断+限时电流速断—主保护；  
过电流—后备保护



③灵敏度校验 对本条线路及下一条线路或设备相间故障都有反应能力，反应能力用灵敏系数衡量。本条线路后备保护的灵敏系数规定

$$K_{lm(近)} = \frac{I_{d.min.本末}}{I_{dz}^{///}} \geq 1.5$$

作为下一条线路后备保护灵敏系数，规定

$$K_{lm(远)} = \frac{I_{d.min.下一末}}{I_{dz}^{///}} \geq 1.2$$

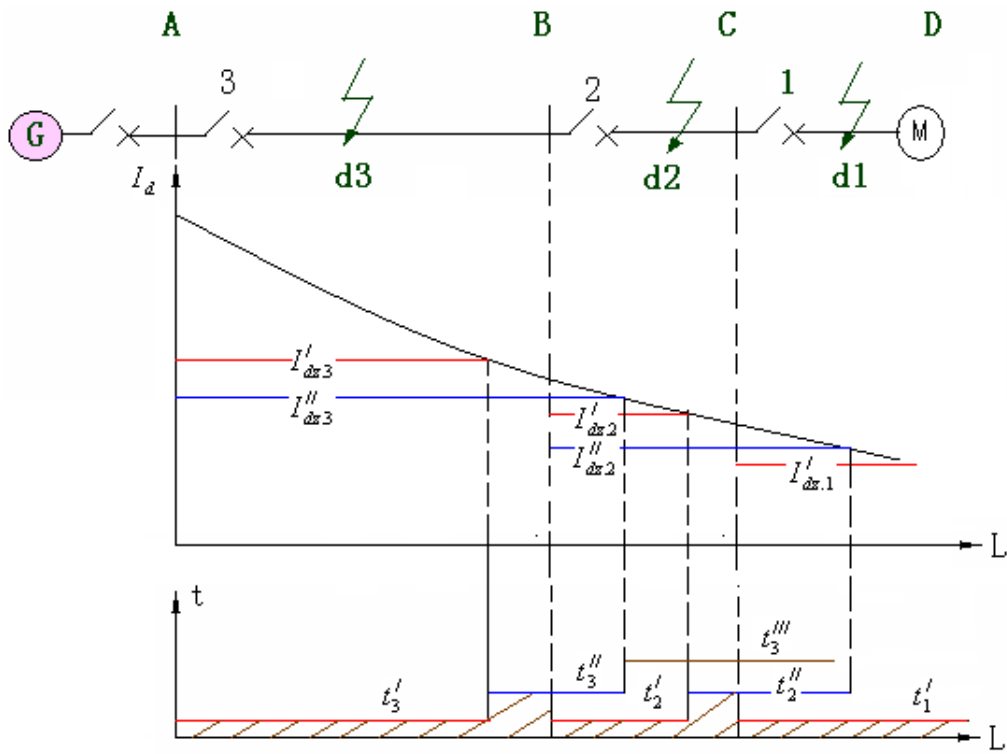
## (2)评价

对单侧电源的放射型电网能保证有选择性的动作。能作为本线路的近后备（有时作为主保护），也能作为下一条线路的远后备。**缺点**是越靠近电源端其动作时限越大，对靠近电源端的故障不能快速切除。

西南交通大学



## 四、三段式电流保护



西南交通大学



- **共同点**：反应于电流升高而动作
- **区别**：按不同整定原则选择起动电流。**速断**按躲开保护范围末端的最大短路电流整定；**限时速断**按相邻线路电流速断保护的動作电流来整定；**过电流保护**按躲开最大负荷电流整定。

电流速断不能保护线路全长，限时电流速断又不能作为相邻元件的后备保护。为保证迅速而有选择性地切除故障，将三种保护组合在一起，构成**阶段式**电流保护。

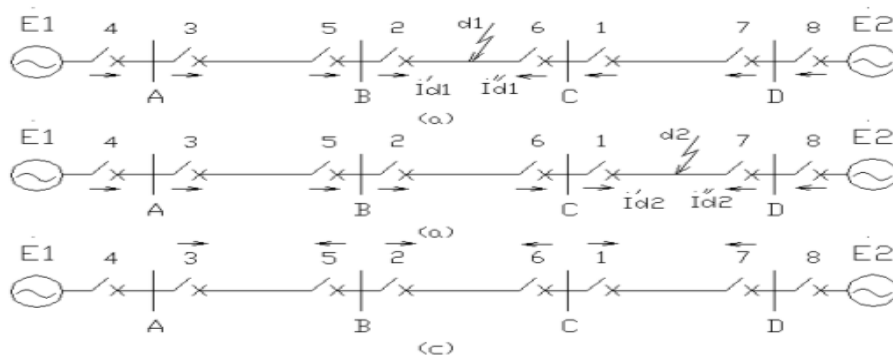
- **优点**：简单、可靠，一般情况下也能满足快速切除故障的要求。在电网特别是在35kV及以下的较低电压的网络中获得了广泛的应用。
- **缺点**：受电网**接线**及电力系统**运行方式**变化的影响较大，如**整定值**必须按**系统最大运行方式**选择，**灵敏性**必须用**系统最小运行方式**校验，往往不能满足**灵敏系数**或**保护范围**要求。



### 第三节 电网相间短路的方向电流保护

#### 一 方向电流保护的基本原理

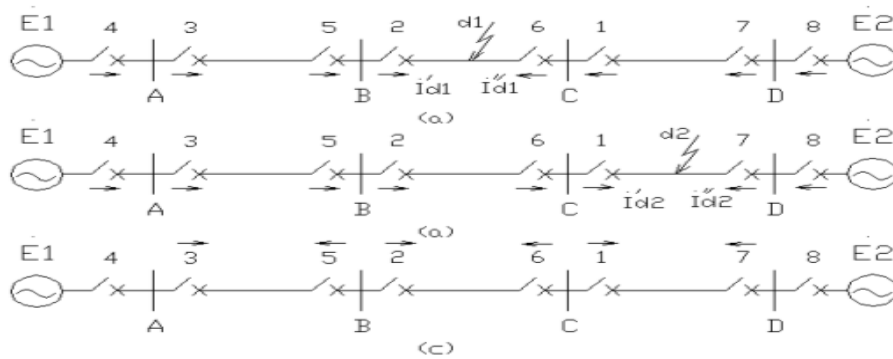
现代电力系统，由多电源组成。假设：断路器8断开，保护1、2、3、4的选择性能够保证。如果E1不存在，保护5、6、7、8同样能够保证动作的选择性。



### 若两个电源同时存在

当  $d_1$  点短路，应由距故障点最近的保护2和6切除故障。

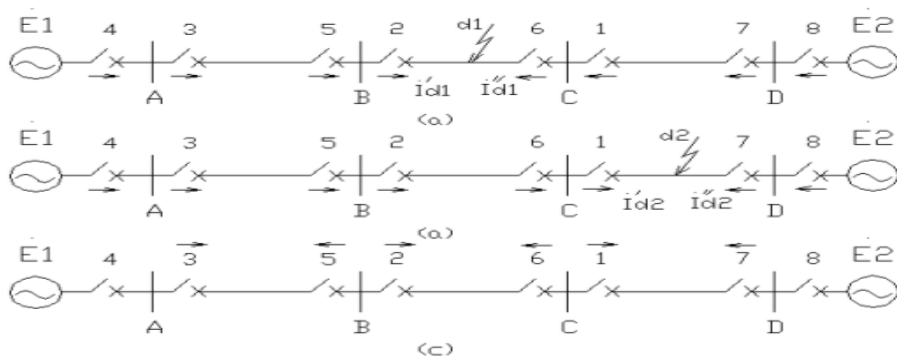
如果保护1采用电流速断且  $I''_{d1}$  大于保护装置的启动电流，就要误动；



$d_2$  点短路时，本应由保护1和7动作切除故障

如果  $I'_{d2} > I'_{dz\cdot6}$  则保护6的电流速断要误动作；

同理，其它地点短路时，对有关的保护装置也能得出相应的结论。



西南交通大学

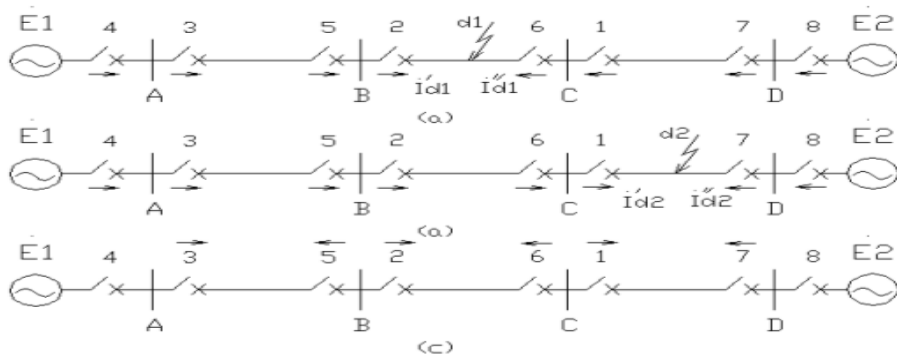


## 如何解决这一矛盾？

①**误动作**的保护都是在自己所保护的**线路反方向**发生故障时，由**对侧电源**供给的短路电流引起的。

②对误动作的保护而言，实际短路**功率的方向**都是由**线路流向母线的**。

③需要在可能误动作的保护上装设一个**功率方向闭锁元件**，该元件只当短路功率方向由**母线流向线路**时动作，由**线路流向母线**时**不动作**，从而继电保护的**动作**具有一定的方向性。

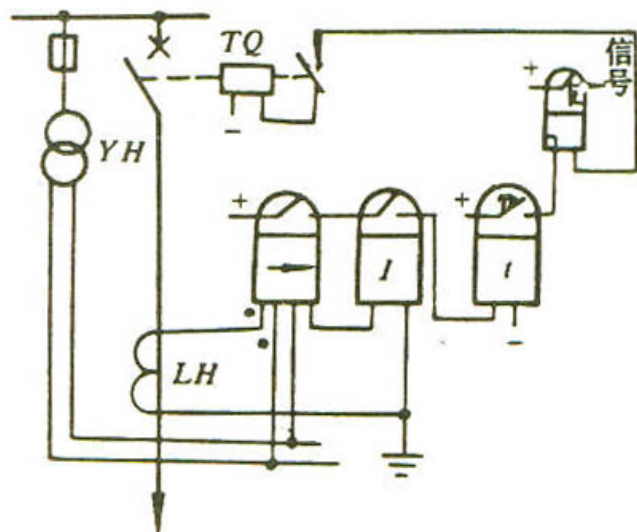


西南交通大学



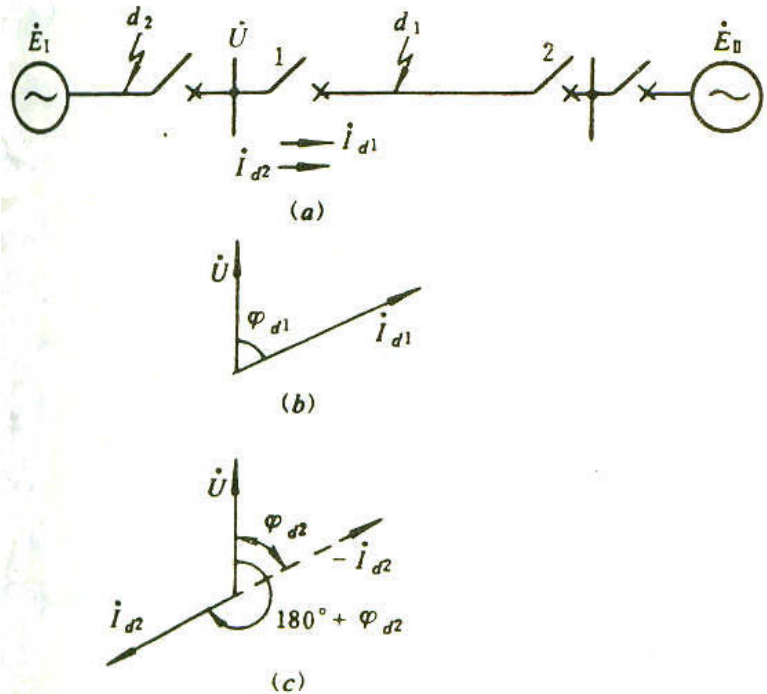


方向性过电流保护的单相原理接线如图，主要由**方向元件**，**电流元件**和**时间元件**组成。方向元件和电流元件必须都动作以后，才能起动时间元件，再经过预定延时后动作于跳闸。



## 二、功率方向继电器的工作原理

对保护1而言，当正方向  $d_1$  三相短路时， $i_{d1}$  从保护安装处母线流向线路，滞后于该母线电压一个相角  $\varphi_{d1}$



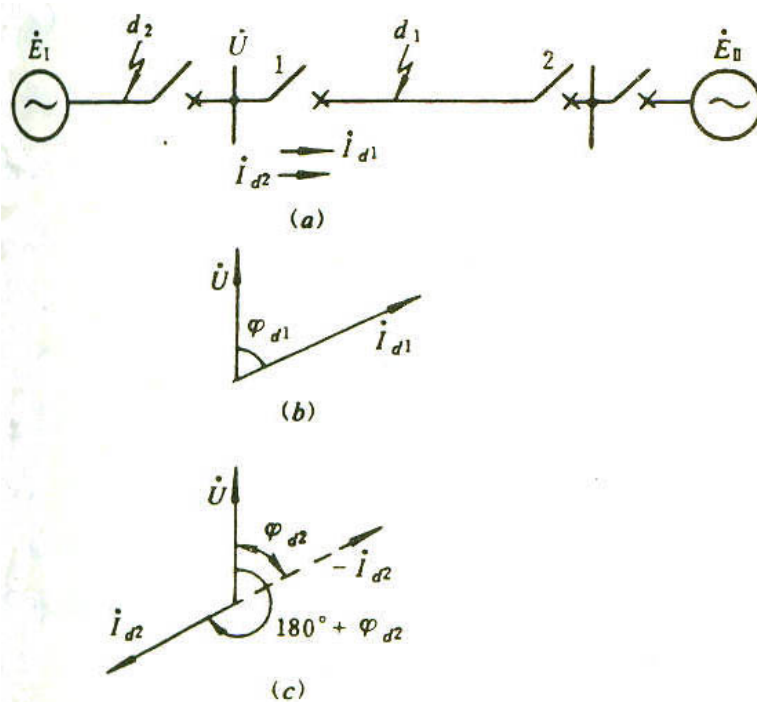
$$0^\circ < \varphi_{d1} < 90^\circ$$



当反方向 $d_2$ 点短路时，则 $i_{d2}$ 滞后于母  
线电压的相角将是

$$180^\circ + \varphi_{d2}$$

和 $i_{d1}$ 的相位相差大  
约 $180^\circ$



因此，可判别短路功率的方向或电流、电压之间的相位关系，来判别发生故障的方向。

判别功率方向或测定电流电压间相位角的继电器称为 **功率方向继电器**



对功率方向继电器的基本要求是：

(1)具有明确的方向性，即在正方向发生各种故障(包括故障点有过渡电阻的情况)时，能可靠动作，而在反方向故障时，可靠不动作。

(2)故障时继电器的动作有足够的灵敏度。

动作功率

$$P = U_J I_J \cos(\varphi_J - \varphi_{lm})$$
$$-90 < \varphi_J - \varphi_{lm} < 90, P > 0$$

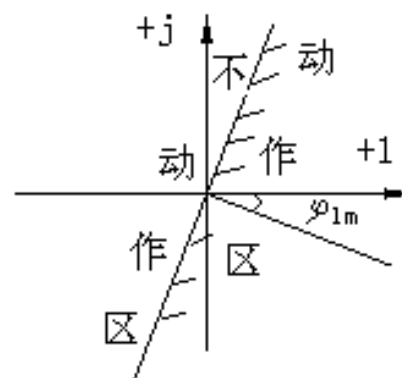
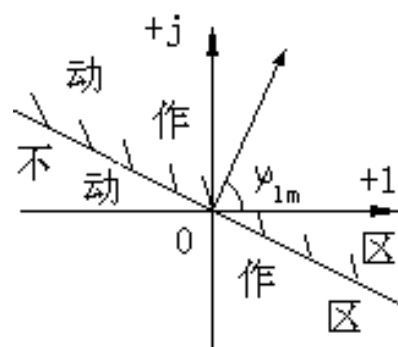
当电压和电流的幅值不变时，功率输出随两者间相位差的大小而改变，输出为最大时的相位差称为继电器的最大灵敏角



动作方程为：

$$\varphi_{lm} + 90^\circ \geq \arg \frac{\dot{U}_J}{\dot{I}_J} \geq \varphi_{lm} - 90^\circ$$

为了保证正方向故障， $\varphi_d$ 在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化时，继电器都能可靠动作，其动作角度范围通常取为  $\varphi_{lm} \pm 90^\circ$ 。此动作特性在复平面上是一条直线。



西南交通大学



采用这种接线时，在其正方向出口附近发生三相短路，A-B或C-A两相接地短路，以及A相接地短路时，由于  $U_A \approx 0$  或数值很小，使A相继电器不能动作，这称为继电器的“电压死区”。

为了减小和消除死区，例如对A相的方向继电器加入电流  $\dot{I}_A$  和电压  $\dot{U}_{BC}$ ，此时  $\varphi_J = \arg \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{I}_A}$ ，当正方向短路时， $\varphi_J = \varphi_d - 90^\circ = -30^\circ$ ；反方向短路时， $\varphi_J = 150^\circ$ 。在这种情况下，继电器的最大灵敏角应设计为  $\varphi_{lm} = \varphi_d - 90^\circ = -30^\circ$ ，动作方程为：

$$90^\circ - \alpha \geq \arg \frac{\dot{U}_J}{\dot{I}_J} \geq -90^\circ - \alpha$$

$\alpha$  称为功率方向继电器的内角

西南交通大学



用功率的形式表示为： $U_J I_J \cos(\varphi_J + a) > 0$

对A相的功率方向继电器，表示为： $U_{BC} I_A \cos(\varphi_J + a) > 0$

除正方向出口附近发生三相短路时， $U_{BC} \approx 0$ ，继电器具有很小的电压死区外，在其它任何包括A相的不对称短路时， $I_A$ 的电流很大， $U_{BC}$ 的电压很高，因此继电器不仅没有死区，而且动作灵敏度很高。为了减小和消除三相短路时的死区，可以采用电压记忆回路，并尽量提高继电器动作时的灵敏度。





### 三、功率方向继电器的接线方式

功率方向继电器的**主要任务**：判断短路功率的方向。

接线方式要求：

(1)正方向任何型式的故障都能动作，而反方向故障则不动作。

(2)故障后加入继电器的电流  $I_J$  和电压  $U_J$  应尽可能地大一些，并尽可能使  $I_J$  接近于最灵敏角  $\alpha_{min}$ ，以便消除和减小方向继电器的死区。因此，功率方向继电器广泛采用的是  $90^\circ$  接线方式。

**$90^\circ$ 接线方式**：在三相对称的情况下，当  $I_A$  和  $\dot{U}_{BC}$  相位差  $90^\circ$  时，加入继电器的电流如  $\dot{I}_A$  和电压  $\dot{U}_{BC}$  相位差  $90^\circ$ 。

该接线方式下，线路上发生各种故障时动作情况，讨论：



### (1)正方向发生三相短路

取A相分析

$$\dot{U}_{JA} = \dot{U}_{BC}$$

$$\dot{I}_{JA} = \dot{I}_A$$

$$\varphi_{JA} = \varphi_d - 90^\circ$$

A相继电器的动作条件应为：

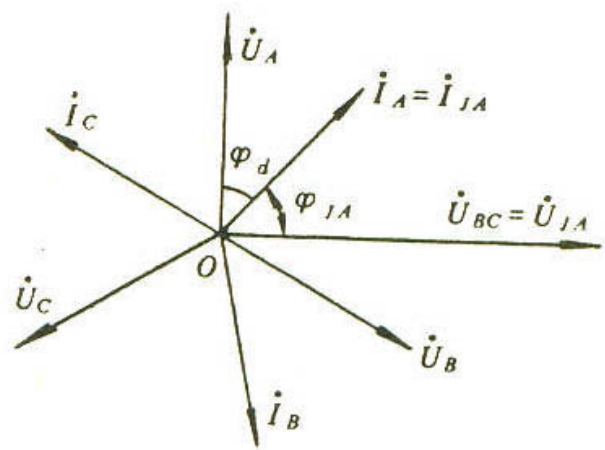
$$U_{BC} I_A \cos(\varphi_d - 90^\circ + \alpha) > 0$$

为使继电器工作最灵敏，

应使  $\cos(\varphi_d - 90^\circ + \alpha) = 1$  ，

即要求  $\varphi_d + \alpha = 90^\circ$  。

因此，如果线路的阻抗角  $\varphi_d = 60^\circ$  ，则应取内角  $\alpha = 30^\circ$  ，如果  $\varphi_d = 45^\circ$  ，则取  $\alpha = 45^\circ$  等。



电力系统中电缆或架空线路的阻抗角(包括含有过度电阻短路的情况)都位于  $0^\circ < \varphi_d < 90^\circ$  之间,为使方向继电器在任何  $\varphi_d$  的情况下均能动作,就必须要求上式始终大于0,为此需要选择一个合适的内角才能满足要求:

当  $\varphi_d \approx 0^\circ$  时

必须选择  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$

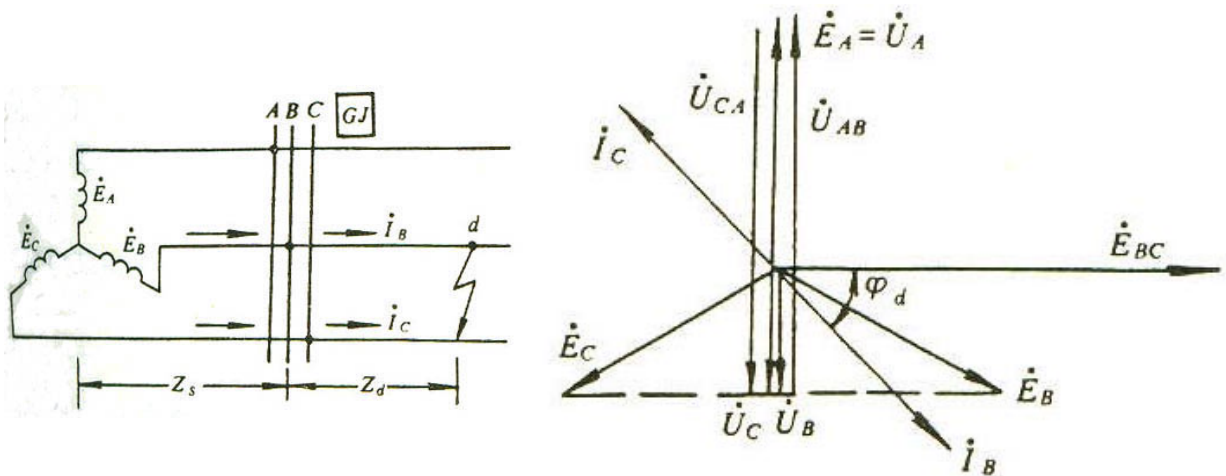
$\longrightarrow 0^\circ < \alpha < 90^\circ$

$\varphi_d \approx 90^\circ$

必须选择  $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$



## (2) 正方向发生两相短路



西南交通大学



两种情况:

①短路点位于保护安装地点附近

短路阻抗  $Z_d \ll Z_s$  (保护安装处到电源间的系统阻抗), 极限时取  $Z_d = 0$ , 短路电流  $i_B$  由电势  $\dot{E}_{BC}$  产生,  $i_B$  滞后  $\dot{E}_{BC}$  的角度为  $\varphi_d$ , 电流  $\dot{I}_C = -\dot{I}_B$ , 短路点电压为:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{dA} = \dot{E}_A \quad \dot{U}_B = \dot{U}_{dB} = -\frac{1}{2}\dot{E}_A \quad \dot{U}_C = \dot{U}_{dC} = -\frac{1}{2}\dot{E}_A$$

对A相继电器:  $\dot{U}_{JA} = \dot{U}_{BC} \quad I_A \approx 0 \quad \longrightarrow$  继电器不动作。

对B相继电器:  $\dot{U}_{JB} = \dot{U}_{CA} \quad \dot{I}_{JB} = \dot{I}_B \quad \varphi_{JB} = \varphi_d - 90^\circ$

动作条件为:  $U_{CA} I_B \cos(\varphi_d - 90^\circ + \alpha) > 0 \quad \longrightarrow$  使继电器动作, 选择内角为  $\alpha$

对C相继电器:  $\dot{U}_{JC} = \dot{U}_{AB} \quad \dot{I}_{JC} = \dot{I}_C \quad \varphi_{JC} = \varphi_d - 90^\circ$

动作条件为:  $U_{AB} I_C \cos(\varphi_d - 90^\circ + \alpha) > 0 \quad 0^\circ < \alpha < 90^\circ$

西南交通大学



②短路点远离保护安装地点，且系统容量很大

$Z_d \gg Z_s$ ，极限时取  $Z_s = 0$ ，电流  $i_B$  仍由电势  $\dot{E}_{BC}$  产生，并滞后  $\dot{E}_{BC}$  一个角度  $\varphi_d$ ，保护安装地点电压为：

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{dB} + \dot{I}_B Z_d \approx \dot{E}_B$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{dC} + \dot{I}_C Z_d \approx \dot{E}_C$$

A相继电器： $I_A \approx 0 \longrightarrow$  不动作。

B相继电器： $\dot{U}_{JA} \approx \dot{E}_{CA}$

$$\varphi_{JB} = -(90^\circ + 30^\circ - \varphi_d) = \varphi_d - 120^\circ$$

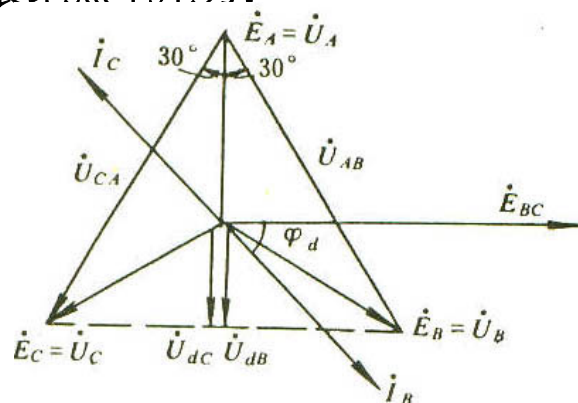
$$U_{CA} I_B \cos(\varphi_d - 120^\circ + \alpha) > 0$$

当  $0^\circ < \varphi_d < 90^\circ$  动作条件  $30^\circ < \alpha < 120^\circ$

C相继电器： $\dot{U}_{JC} \approx \dot{E}_{AB}$

$$\varphi_{JC} = -(90^\circ - 30^\circ - \varphi_d) = \varphi_d - 60^\circ$$

$U_{AB} I_C \cos(\varphi_d - 60^\circ + \alpha) > 0$  动作条件为： $-30^\circ < \alpha < 60^\circ$



西南交通大学



综合以上两种极限情况可得出，在正方向任何地点两相短路时，B相继电器能够动作的条件是  $30^\circ < \alpha < 90^\circ$ ；C相继电器为  $0^\circ < \alpha < 60^\circ$

因此，当  $0^\circ < \varphi_d < 90^\circ$  时，方向继电器在一切故障情况下都能动作的条件为：

$$30^\circ < \alpha < 60^\circ$$

用于相间短路的功率方向继电器提供  $\alpha = 45^\circ$  和  $\alpha = 30^\circ$  两个内角，满足上述要求。

以上讨论只是继电器在各种情况下可能动作的条件，而不是动作最灵敏的条件。为了减小死区电压范围，继电器动作最灵敏的条件，应根据三相短路时使  $\cos(\varphi_J + \alpha) = 1$  来决定，对某一确定了阻抗角的输电线路，采用  $\alpha = 90^\circ - \varphi_d$ ，以便获得最大的灵敏度。

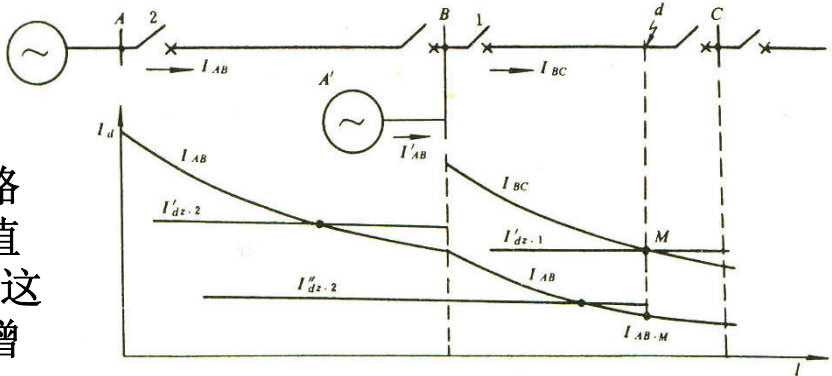


## 四 关于分支系数

与下一级保护的电流速断相配合，需考虑保护安装地点与短路点之间有电源或线路（通常称为分支电路）的影响。归纳为：

### ①助增电流的影响

分支电路中有电源，故障电路中短路电流  $I_{BC} > I_{AB}$ ，其值为  $I_{BC} = I_{AB} + I'_{AB}$ 。这种使故障线路电流增大的现象——助增。



保护1电流速断仍按躲开相邻线路出口短路整定为  $I'_{dz\cdot 1}$ ，保护范围末端位于M点。此时，流过保护2电流为  $I_{AB\cdot M}$ ，小于  $I_{BC\cdot M}$  ( $= I'_{dz\cdot 1}$ )，因此保护2整定值为  $I''_{dz\cdot 2} = K''_k I_{AB\cdot M}$

西南交通大学





引入分支系数

$$K_{fz} = \frac{\text{故障线路流过的短路电流}}{\text{前一级保护所在线路上流过的短路电流}}$$

整定配合点M的分支系数为

$$K_{fz} = \frac{I_{BC \cdot M}}{I_{AB \cdot M}} = \frac{I'_{dz \cdot 1}}{I_{AB \cdot M}}$$

与单侧电源线路公式相比，分母多一个大于 1 的分支系数影响。

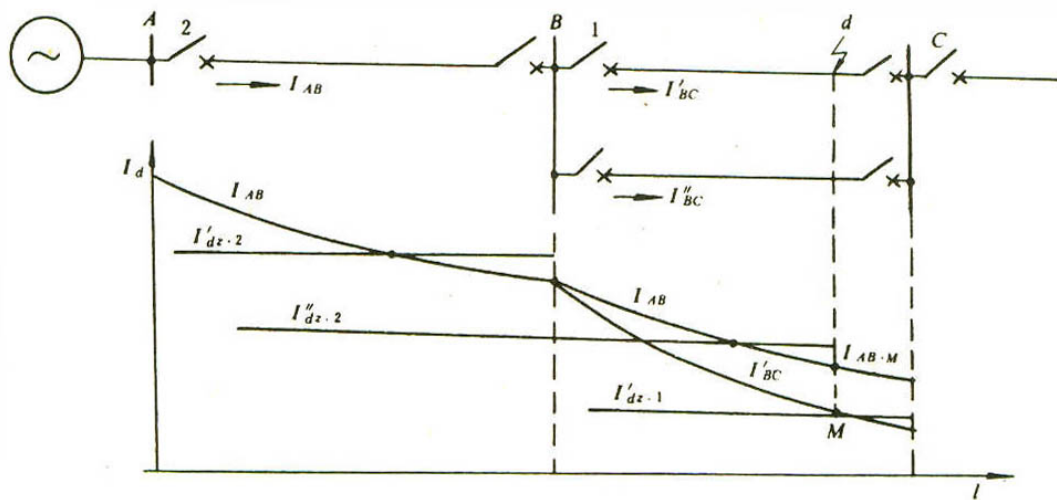
$$I''_{dz \cdot 2} = \frac{K_k''}{K_{fz}} I'_{dz \cdot 1}$$

西南交通大学



## ②外汲电流的影响

分支电路为一并联的线路，此时故障线路中电流 $I'_{BC}$ 小于 $I_{AB}$ ，关系 $I_{AB} = I'_{BC} + I''_{BC}$ 这种使故障线路中电流减小的现象—**外汲**，分支系数 $K_{fz} < 1$ 。分析同于有助增电流的情况。



西南交通大学

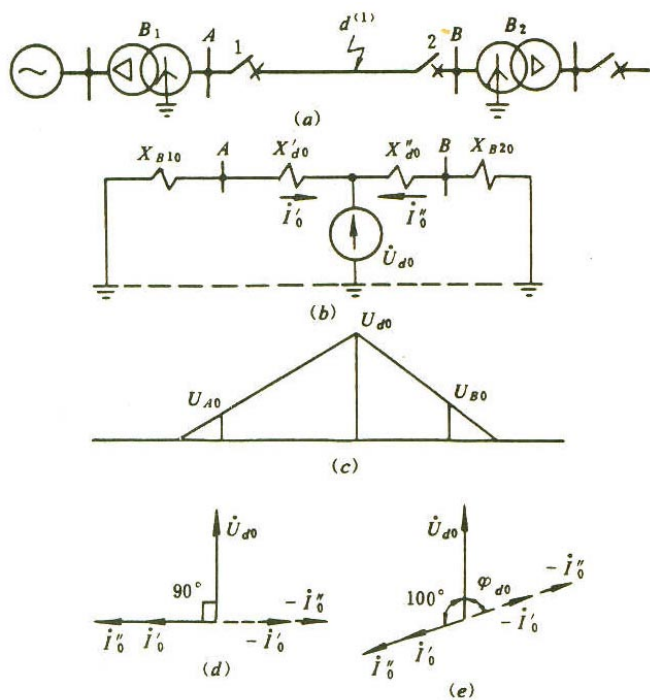


③当变电所B线上既有电源又有并联的线路时，其分支系数可能大于1也可能小于1，此时应根据实际可能的运行方式，选取分支系数的最小值进行整定。

### (3)过电流保护

一般很难从整定值上躲开主要决定于动作时限

## 第四节 中性点直接接地电网中接地短路的零序电流及方向保护



电力系统发生**接地短路**时，利用对称分量法将电流和电压分解成正序、负序和零序分量，短路计算的**零序等效网**如图，**零序电流**看成在故障点出现一个**零序电压**产生，经变压器接地的中性点构成回路。零序电流方向为**母线流向故障点为正**，零序电压的方向为**线路高于大地的电压为正**，如图“↑”所示。

西南交通大学



## 零序分量的特点

- 故障点的零序电压最高，距故障点越远处零序电压越低。
- 零序电流由 $\dot{U}_{d0}$ 产生的，忽略回路电阻， $i'_0$ 和 $i''_0$ 超前 $\dot{U}_{d0}$   $90^\circ$ ，计及回路电阻时，如取零序阻抗角为 $\varphi_{d0} = 80^\circ$ ， $i'_0$ 和 $i''_0$ 将超前 $\dot{U}_{d0}$   $100^\circ$ 。

零序电流的分布，决定于线路零序阻抗和中性点接地变压器的零序阻抗，与电源数目和位置无关。如当变压器的中性点不接地时，则 $i''_0 = 0$ 。

- 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，零序功率的方向实际上都是由线路流向母线的。
- 从任一保护(例如保护1)安装处的零序电压和电流之间的关系看，由于A母线上的零序电压实际是从该点到零序网络中性点之间零序阻抗上的电压降，表示为



$$\dot{U}_{A0} = (-I'_0)Z_{B1\cdot0}$$

式中 $Z_{B1\cdot0}$ ——变压器 $B_1$ 的零序阻抗。

该处零序电流与零序电压之间的相位差由变压器阻抗角决定与被保护线路的零序阻抗及故障点的位置无关。

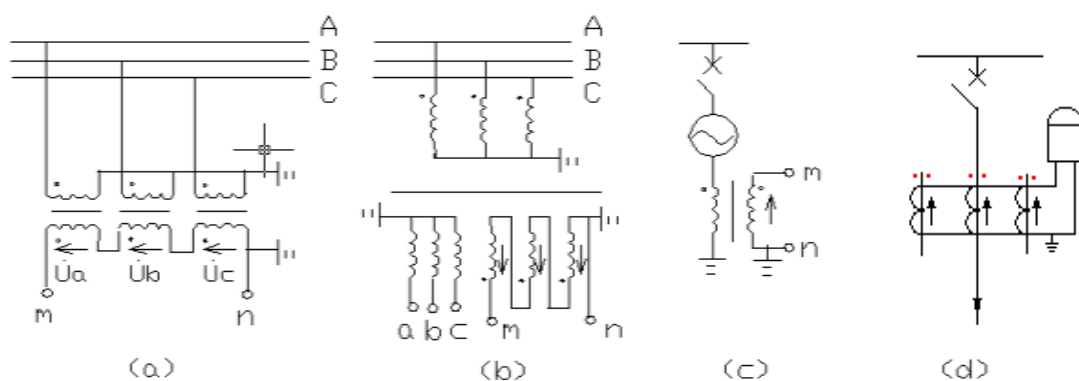
➤ 电力系统运行方式变化时，如果输电线路和中性点接地的变压器数目不变，零序阻抗和零序等效网络就是不变的。此时，系统的正序阻抗和负序阻抗随运行方式而变化。正、负序阻抗的变化将引起 $U_{d1}$ 、 $U_{d2}$ 、 $U_{d0}$ 之间电压分配的改变，间接影响零序分量的大小。

用零序电流和零序电压过滤器可实现接地短路的零序电流和方向保护。



中性点直接接地的电网（大电流接地系统）中发生接地短路时，出现很大零序电流，正常运行时不存在。

### 一、零序电压、电流过滤器与不平衡电流



## 二、零序电流速断(零序 I 段)保护

### 整定原则:

(1)躲开下一条线路出口处单相或两相接地短路时可能出现的最大零序电流 $3I_{0\bullet\max}$ , 可靠系数  $K'_k$ (取1.2~1.3) 即

$$I'_{dz} = K'_k 3I_{0\bullet\max}$$

(2)躲开断路器三相触头不同期合闸所出现的最大零序电流 $3I_{0\bullet br}$ ,

$$I'_{dz} = K_k 3I_{0\bullet br}$$

如保护装置动作时间大于断路器三相不同期合闸时间, 不考虑。

**整定值选其中较大者。**在有些情况下, 按照条件(2)整定将使起动电流过大, 保护范围缩小时, 采用在手动合闸及三相自动重合闸时, 使零序 I 段带一个小延时(约0.1s)躲过断路器三相不同期合闸的时间, 定值上无需考虑条件(2)。

西南交通大学





(3)当线路上采用单相自动重合闸时，按条件(1)(2)整定的零序 I 段，往往不能躲开在非全相运行状态下又发生系统振荡时所出现的最大零序电流，如按这一条件整定，正常时发生接地故障时，保护范围又缩小，不能充分发挥零序 I 段的作用。

为解决这个矛盾，设置两个零序 I 段保护：

① 按条件(1)或(2)整定(其定值较小，保护范围较大，称灵敏 I 段)，任务是対全相运行状态下接地故障起保护作用，具有较大保护范围，当单相重合闸启动时，将其自动闭锁，需待恢复全相运行时才能重新投入。

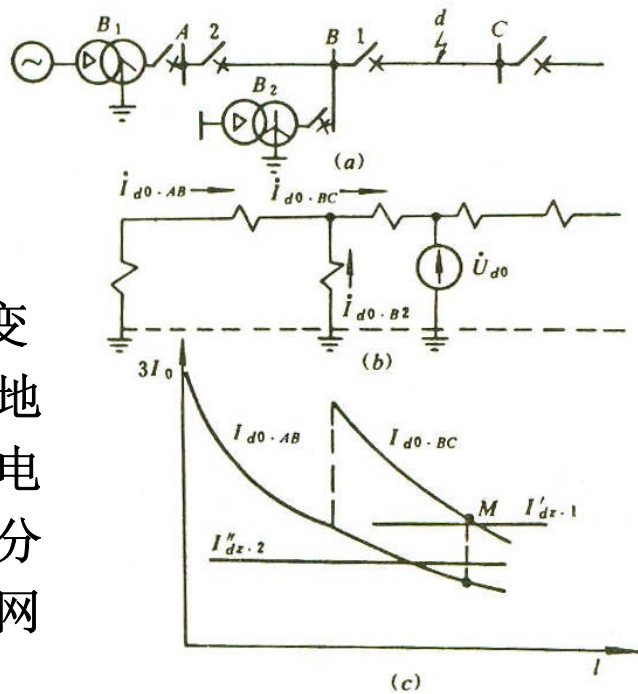
② 按条件(3)整定(定值较大，称不灵敏 I 段)，它的主要目的是为了在单相重合闸过程中，其它两相又发生接地故障时，弥补失去灵敏 I 段的缺陷，尽快将故障切除。不灵敏 I 段也能反应全相运行状态下接地故障，保护范围较灵敏 I 段小。



### 三、零序电流限时速断(零序II段)保护

首先考虑和下一条线路的零序电流速断相配合，并带有高出一个的时限，以保证动作的选择性。

当两个保护之间的变电所母线上有中性点接地的变压器时，由于分支电路的影响将零序电流的分布变化，此时零序等效网与零序电流变化曲线如图。



图。

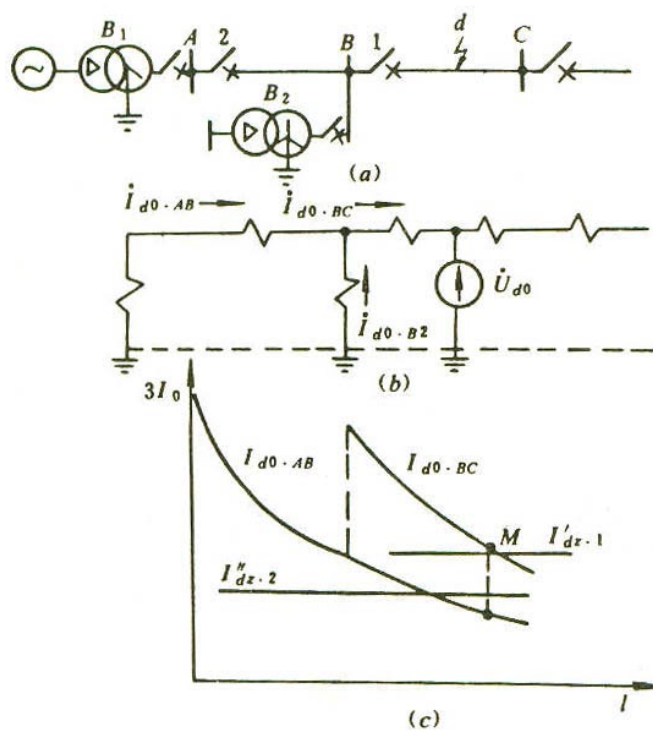
西南交通大学



当线路B-C上接地短路时，流过保护1和2的零序电流分别为  $\dot{I}_{d0 \cdot BC}$  和  $\dot{I}_{d0 \cdot AB}$ ，两者之差就是从变压器  $B_2$  中性点流回的电流  $\dot{I}_{d0 \cdot B2}$ 。

与方向性电流保护有助增电流的情况相同，引入零序电流的分支系数  $K_{0fz}$  之后，则零序II段的起动电流应整定为

$$I''_{dz \cdot 2} = \frac{K_k''}{K_{0fz}} I'_{dz \cdot 1}$$



变压器  $B_2$  切除或中性点不接地运行时，支路从零序等效网络中断开， $K_{0fx} = 1$ 。

零序 II 段的灵敏系数，按本线路末端接地短路时的最小零序电流校验，并应满足  $K_{lm} \geq 1.5$ 。当下一条线路比较短或运行方式变化较大，不能满足灵敏系数要求，考虑：

- ①使零序 II 段保护与下一条线路的零序 II 段相配合，时限再抬高一级，取为 1—1.2s；
- ②保留 0.5s 的零序 II 段，再增加一个 1—1.2s 的零序 II 段；
- ③采用接地距离保护。



#### 四、零序过电流(零序III段)保护

**作用：**相当于相间短路的过电流保护，一般作为后备保护，在中性点直接接地电网中的终端线路上，可作为主保护使用。

在零序过电流保护中，起动电流原则上按照躲开在下一条线路出口处相间短路时所出现的最大不平衡电流  $I_{bp\bullet\max}$  来整定，引入可靠系数  $K_k$ ，即为

$$I_{dz\bullet J}^{///} = K_k I_{bp\bullet\max}$$

注意 J-二次值



实际上必须按逐级配合原则考虑，即本保护零序Ⅲ段的保护范围，不能超出相邻线路上零序Ⅲ段的保护范围。当两个保护之间具有分支电路时，保护装置的起动电流应整定为

$$I_{dz\cdot 2}^{///} = \frac{K_k}{K_{0fz}} I_{dz\cdot 1}^{///}$$

式中： $K_k$  —可靠系数，一般取为1.1~1.2；

$K_{0fz}$  —相邻线路的零序Ⅲ段保护范围末端发生接地短路时，故障线路中零序电流与流过本保护装置中零序电流之比。

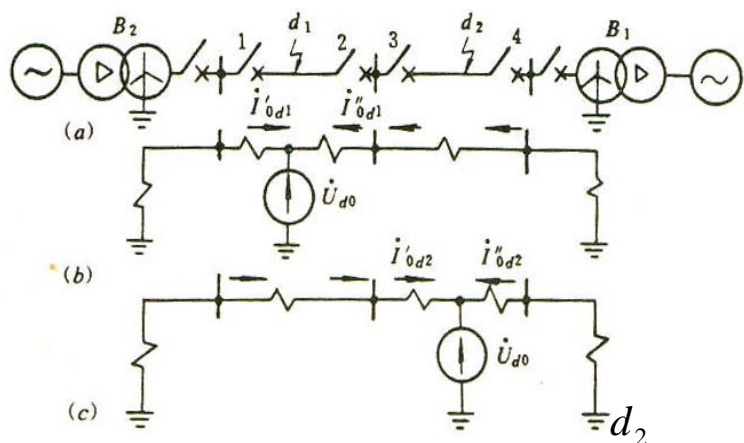
**灵敏系数：**作为相邻元件的后备保护时，按照相邻元件末端接地短路时，流过本保护的最小零序电流（应考虑分支电路的影响）来校验。

西南交通大学



## 五、方向性零序电流保护

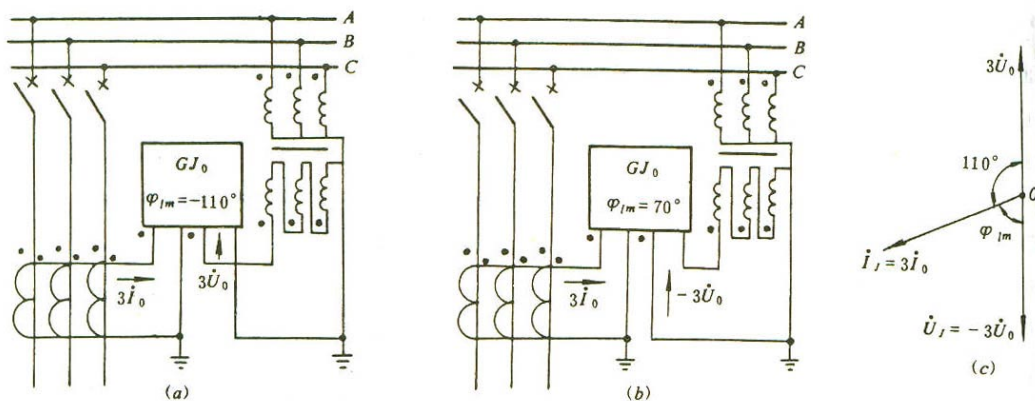
在双侧或多侧电源网络中，电源处变压器中性点一般至少有一台接地，由于零序电流实际流向是由故障点流向各个中性点接地的变压器，因此要考虑零序电流保护动作方向性问题。



题。两侧电源处的变压器中性点均直接接地，当  $d_1$  点短路时，零序等效网络和零序电流分布如图，按选择性要求，应由保护1和2动作切除故障，但是零序电流  $I''_{0d1}$  流过保护3时，就可能引起它的误动作；同样当  $d_2$  点短路时，零序电流  $I'_{0d2}$  又可能使保护2误动作。



根据零序分量的特点，零序功率方向继电器显然应该采用最大灵敏角  $\varphi_{lm} = -95^\circ \sim -110^\circ$ ，当按规定极性对应加入  $3\dot{U}_0$  和  $3\dot{I}_0$  时，继电器正好工作在最灵敏的条件下，其接线如图。





由于越靠近故障点的零序电压越高，因此零序方向元件没有电压死区。相反，当故障点距保护安装地点很远时，由于保护安装处的零序电压较低，零序电流较小，继电器反而可能不动作。

灵敏系数校验，当作为相邻元件的后备保护时，即应采用相邻元件末端短路时，在本保护安装处的最小零序电流，电压或功率与功率方向继电器的最小起动电流，电压或起动功率之比来计算灵敏系数，并要求  $K_{lm} \geq 1.5$ 。



## 六、对零序电流保护的评价

### 优点：

- 灵敏度高—相间过电流保护按**最大负荷电流**整定，零序过电流保护按**不平衡电流**整定；单相短路，**故障相电流等于零序电流**
- 动作时限较相间保护短
- 受运行方式影响小
- 零序阻抗较正序阻抗大—电流曲线陡，零序 I 段保护范围大，II 段灵敏度容易满足
- 不受系统振荡，短时过负荷等的影响
- 单相接地故障占全部故障50%-90%，其它故障往往由单相接地发展起来的，因此，零序保护具有显著的优越性。



**缺点：**

- 对于短线路或运行方式变化很大时，不能满足运行要求
- 重合闸动作过程中将出现非全相运行状态，又发生系统振荡时，出现较大的零序电流，影响正确工作，从整定上考虑
- 采用自耦变压器联系两个不同电压等级时，任一网络的接地短路将在另一网络中产生零序电流，使零序保护的整定配合复杂化，并将增大第Ⅲ段保护的动作限

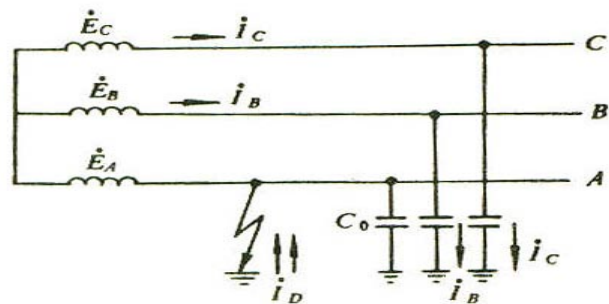


## 第五节 中性点非直接接地电网中单相接地故障的零序电压、电流及方向保护

小接地电流系统中发生单相接地时，由于故障点电流很小，三相之间线电压保持对称，对负荷供电没有影响，允许继续运行1-2小时，而不必立即跳闸。但为了防止故障进一步扩大，应及时发出信号，以便采取措施予以消除。

### 一、中性点不接地电网中单相接地故障的特点

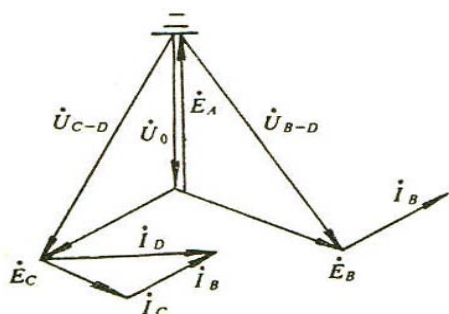
正常运行情况下，三相相对地有相同的电容 $C_0$ ，在相电压的作用下，每相都有一超前于相电压 $90^\circ$ 的电容电流流入地中，而三相电流之和等于零。



西南交通大学



假设 A 相发生单相接地，各相对地的电压为



$$\dot{U}_{A-D} = 0$$

$$\dot{U}_{B-D} = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ}$$

$$\dot{U}_{C-D} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{j150^\circ}$$

故障点  $d$  的零序电压为  $\dot{U}_{d0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{A-D} + \dot{U}_{B-D} + \dot{U}_{C-D}) = -\dot{E}_A$

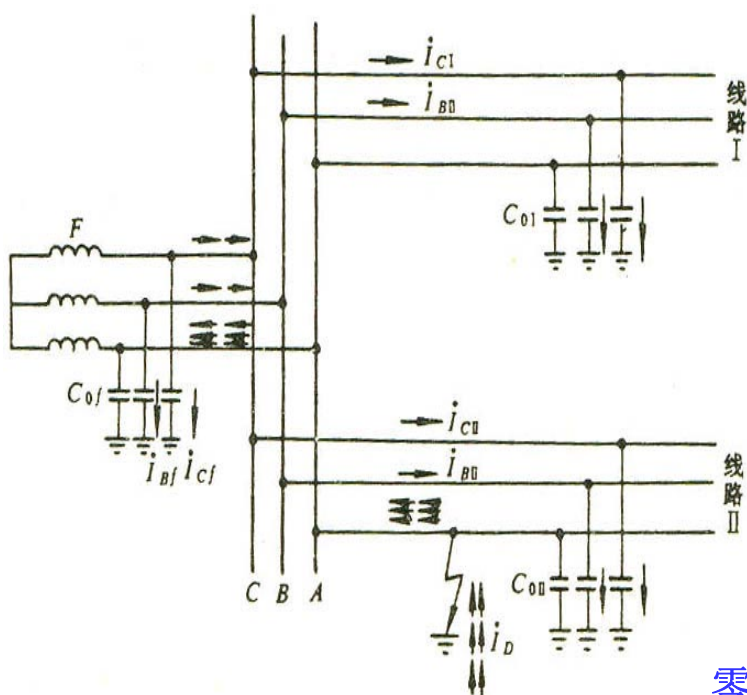
非故障相流向故障点的电容电流为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{U}_{B-D} j\omega C_0 \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_{C-D} j\omega C_0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \dot{I}_D &= \dot{I}_B + \dot{I}_C \\ \dot{I}_D &= 3U_\phi \omega C_0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow I_B = I_C = \sqrt{3}U_\phi \omega C_0 \quad \Rightarrow 3I_0 = \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad \Rightarrow 3I_0 = 3U_\phi \omega C_0$$

西南交通大学





在**非故障线路 I** 上，A相电流为零，B和C相中流有本身的电容电流。因此线路始端所反映的零序电流为

$$3\dot{I}_{01} = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1}$$

有效值为

$$3I_{01} = 3U_{\phi} \omega C_{01}$$

**零序电流**为线路 I 本身的电容电流，电容性无功功率方向由母线流向线路。

西南交通大学



### 在发电机上

$$3\dot{I}_{0f} = \dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf} \quad 3I_{0f} = 3U_{\varphi} \omega C_{0f}$$

即零序电流为发电机本身的电容电流，其电容性无功功率的方向是由母线流向发电机，此特点与非故障线路一样。

**在发生故障的线路Ⅱ**，不同之处是在接地点要流回全系统B和C相对地电容电流之总和，为

$$\dot{I}_D = (\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1}) + (\dot{I}_{B\Pi} + \dot{I}_{C\Pi}) + (\dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf})$$



有效值  $I_D = 3U_\varphi \omega(C_{01} + C_{0\Pi} + C_{0f}) = 3U_\varphi \omega C_{0\Sigma}$   
式中  $C_{0\Sigma}$  为全系统每相对地电容的总和。这样在线路 II 始端所流过的零序电流则为

$$3\dot{I}_{0\Pi} = \dot{I}_{A\Pi} + \dot{I}_{B\Pi} + \dot{I}_{C\Pi} = -(\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf})$$

其有效值为

$$3I_{0\Pi} = 3U_\varphi \omega(C_{0\Sigma} - C_{0\Pi})$$

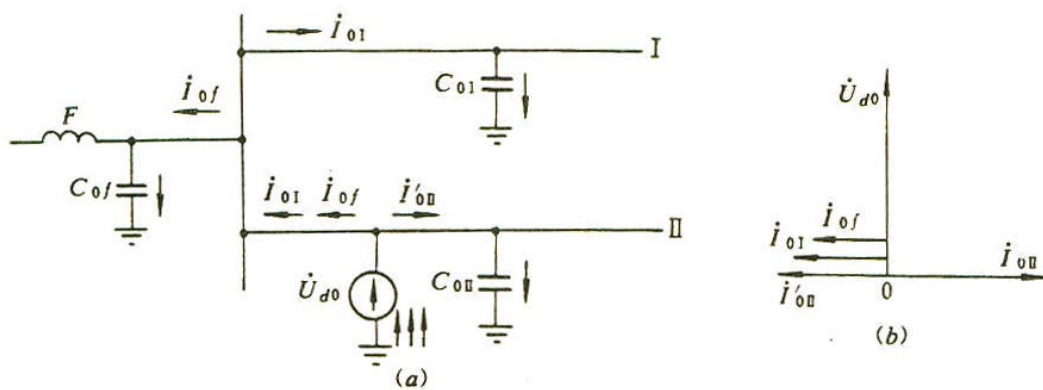
可见由故障线路流向母线的零序电流，数值等于全系统非故障元件对地电容电流之总和，其电容性无功功率的方向为由线路流向母线，与非故障上相反。





单相接地时零序等效网络如图，接地点有一零序电压 $\dot{U}_{d0}$ ，零序电压回路通过各个元件的对地电容构成，由于送电线路的零序阻抗远小于电容的阻抗，可忽略。

在中性点不接地电网中的零序电流，是各元件的对地电容电流，向量关系如图（表示线路II本身的零序电容电流），与直接接地电网完全不同。



西南交通大学



## 二、中性点经消弧线圈接地

- 电容电流大到一定程度（10-30A），燃弧引起过电压，扩大事故
- 发电机中性点经消弧线圈接地，减小接地电流
- 补偿度  $\mu = (I_L - I_{C\Sigma}) / I_{C\Sigma} > 1$



### 结论:

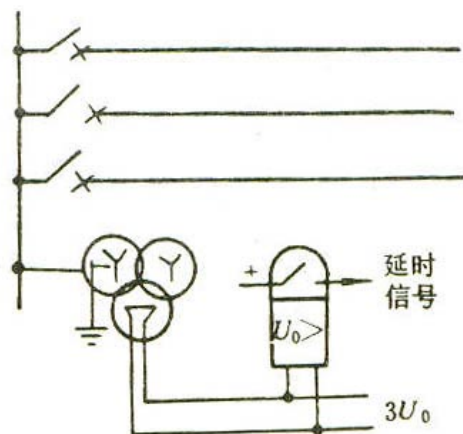
- ①发生单相接地时，全系统都将出现零序电压。
- ②在非故障的元件上有零序电流，其数值等于本身的对地电容电流，电容性无功功率的实际方向为由母线流向线路。
- ③ 障线路上，零序电流为全系统非故障元件对地电容电流之和，数值较大，电容性无功功率实际方向：线路流向母线。



### 三、中性点不直接接地电网中单相接地保护

#### ①绝缘监视装置

在发电厂和变电所的母线上，一般装设网络单相接地的监视装置，如图所示。



## ②选线

**依据零序电流大小：**故障线路零序电流较非故障线路为大，实现有选择性地发出信号或动作于跳闸。

这种保护一般使用在有条件安装零序电流互感器的线路上（如电缆线路或经电缆引出的架空线路）；当单相接地电流较大，足以克服零序电流过滤器中不平衡电流的影响时，保护装置也可接于三个电流互感器构成的零序回路中。

**依据零序功率方向：**故障线路与非故障线路零序功率方向不同，实现有选择性的保护，动作于信号或跳闸。

该方式适用于零序电流不能满足灵敏系数要求和接线复杂的网络中。

另外，还可利用中性点直接接地电网中单相接地故障时产生的高次谐波或故障过渡过程的某些特点来实现保护。



## 小 结

- **基本内容：**继电器简介、单侧电压网络相间短路的电流保护、电网相间短路的方向性电流保护、中性点直接接地电网中接地短路的零序电流及方向保护、中性点非直接接地电网中单相接地短路的零序电压、电流及方向保护。
- **本章重点：**三段式电流保护的工作原理和整定计算、功率方向继电器的工作原理、中性点不接地和直接接地电网中单相接地故障的特点。
- **本章难点：**三段式电流保护的整定计算。

