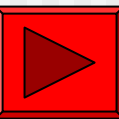


第二章 电网的电流保护 和方向性电流保护

第三节 中性点直接接地电网中 接地短路的零序电流及方向保护



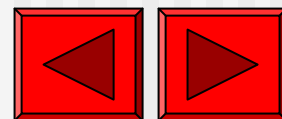
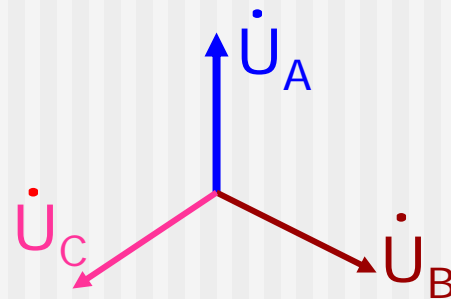
1. 中性点接地电网特征

1) 正常运行或三相短路时

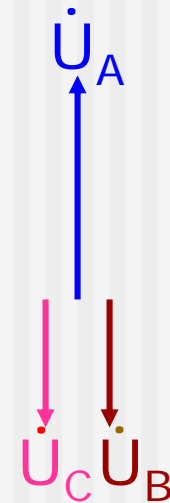
由于三相电压和电流是对称的。

故：

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 0 \\ \dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0 \end{cases}$$



2) 两相短路时, 设为K⁽²⁾_{BC}



在故障点处: $\dot{U}_{dA} = \dot{U}_A$ $\dot{U}_{dB} = \dot{U}_{dC} = -\frac{1}{2}\dot{U}_A$

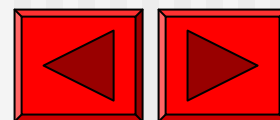
$$\dot{I}_{dA} = 0 \quad \dot{I}_{dB} = -\dot{I}_{dC}$$

故故障点的
零序电压和
零序电流为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{do} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A - \frac{1}{2}\dot{U}_A - \frac{1}{2}\dot{U}_A\right) = 0 \\ \dot{I}_{do} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{dA} + \dot{I}_{dB} + \dot{I}_{dC}) = \frac{1}{3}(0 + \dot{I}_{dB} - \dot{I}_{dB}) = 0 \end{cases}$$

综上

正常运行及相间短路时, 均没有零序电压和零序电流.



3) 单相接地短路, 设为 $K^{(1)}_A$ (中性点接地系统)

■ 在接地故障点,
故障相电压:

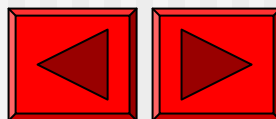
$$\dot{U}_{dA} = 0 \quad \dot{U}_{dB} = \dot{U}_B \quad \dot{U}_{dC} = \dot{U}_C$$

故障相电流:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{dA} \quad \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0$$

■ 故在故障点的零序电压
零序电流为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{do} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{dB} + \dot{U}_{dC}) = \frac{1}{3}(\dot{U}_B + \dot{U}_C) \\ \dot{I}_o = \frac{1}{3}\dot{I}_{dA} \end{array} \right.$$



4) 两相接地短路，设为 $K^{(1,1)}_{BC}$

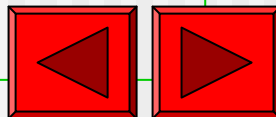
在故障点：

$$\begin{cases} \dot{U}_{dB} = \dot{U}_{dC} = \mathbf{0} & \dot{U}_{dA} = \dot{U}_A \\ \dot{I}_A = \mathbf{0} & \dot{I}_B = \dot{I}_{dB} & \dot{I}_C = \dot{I}_{dC} \end{cases}$$

则：

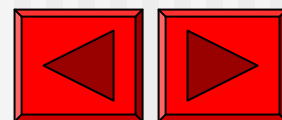
$$\begin{cases} \dot{U}_{do} = \frac{1}{3} \dot{U}_{dA} = \frac{1}{3} \dot{U}_A \\ \dot{I}_o^{(1,1)} = \frac{1}{3} (\dot{I}_{dB} + \dot{I}_{dC}) \end{cases}$$

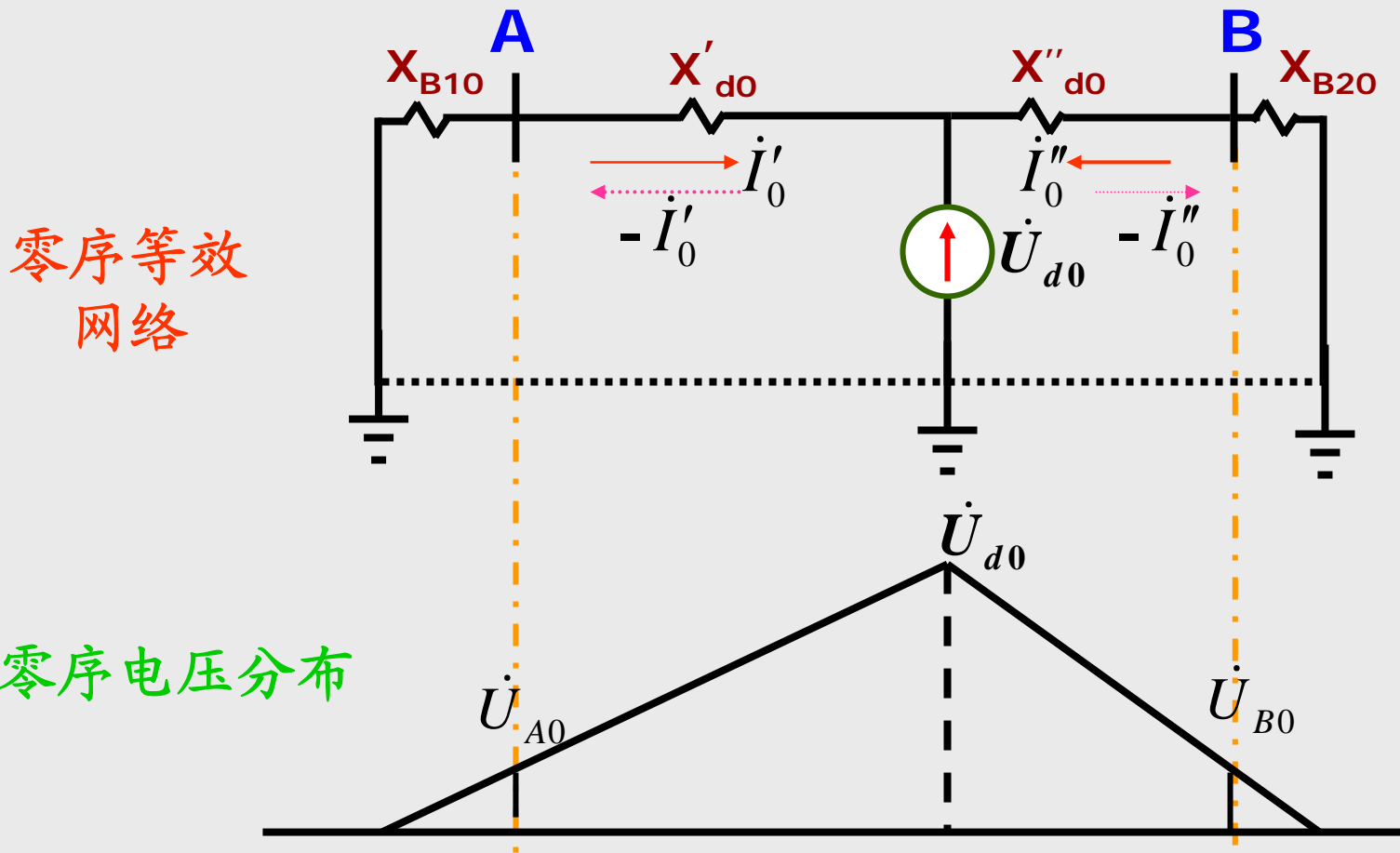
■ 出现零序电压和零序电流是接地故障区别于正常运行和相间短路故障的基本特征。



3. 零序网络

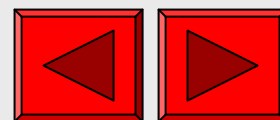
- 纵上分析，在中性点直接接地的电网（又称大接地电流系统，一般为110kV以上电网）中发生接地短路时，将出现很大的零序电流，而正常运行以及相间短路情况下它们是不存在的，因此可利用零序电流来构成接地短路保护。





在故障点处，三相不平衡的程度最严重，零序电压最高

两相接地短路，设为 $K^{(1,1)}_{BC}$
$$\dot{U}_{d0} = \frac{1}{3} \dot{U}_{dA} = \frac{1}{3} \dot{U}_A$$



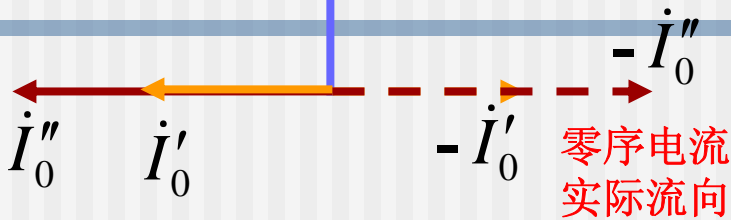
纯感性负荷电流
滞后电压 90°

\dot{U}_{d0}

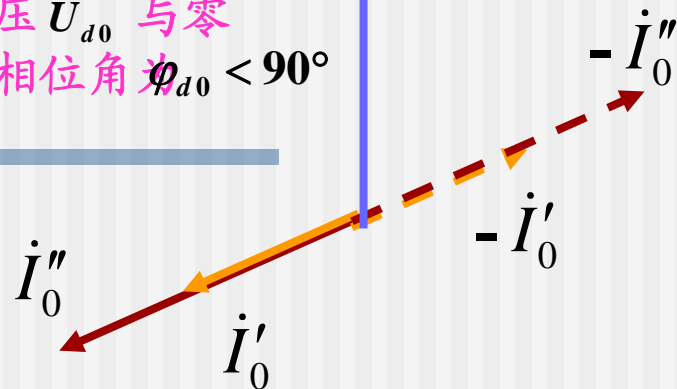
考虑线路中的零序电阻
时，零序电压 \dot{U}_{d0} 与零
序电流之间相位角 $\phi_{d0} < 90^\circ$

\dot{U}_{d0}

按规定正
方向来看
零序电流



忽略电阻时向量图

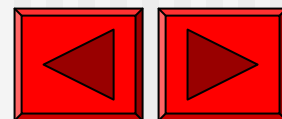


计及电阻时向量图

在电感中，电流滞后电压 90°

利用对称分量的方法将电流和电压分解为正序、负序和零序分量。

零序电流可以看成在故障点出现一个零序电压 \dot{U}_{d0} 而产生的，经变压器中性点构成回路，零序电流的方向仍规定从母线流向故障线路为正，而对零序电压的方向是线路高于大地的电压为正。

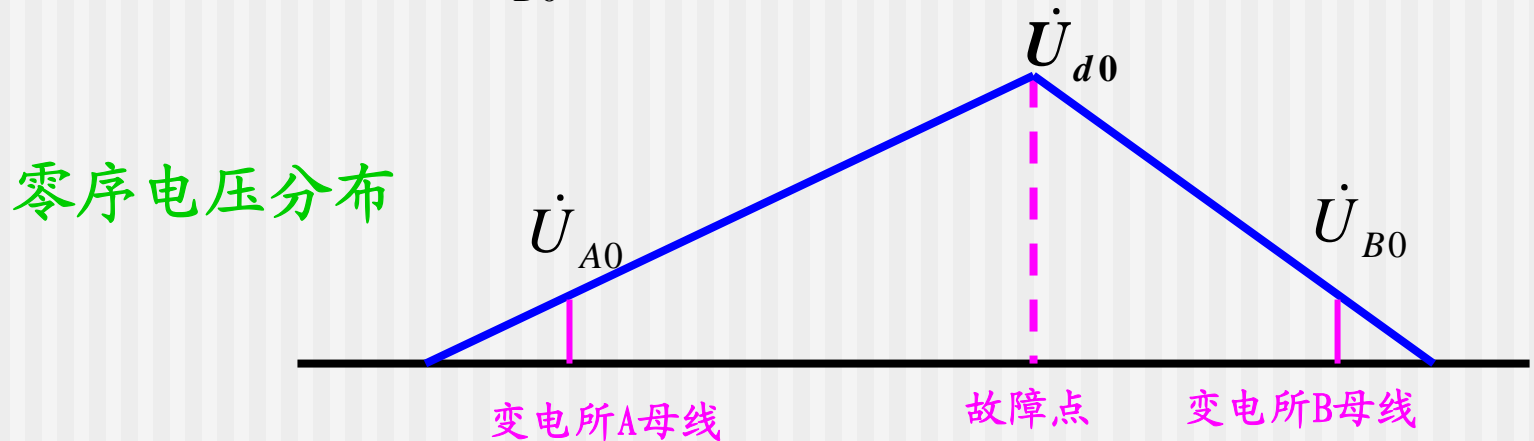


4. 特点

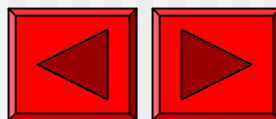
零序分量的参数具有如下特点：

➤ 零序电压：

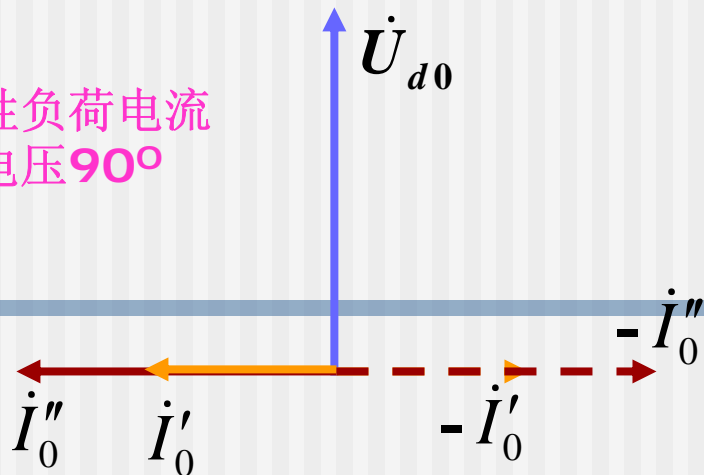
故障点的零序电压最高，变电所A母线上零序电压为 \dot{U}_{A0} ，变电所B母线上零序电压为 \dot{U}_{B0}



变压器中性点接地处的零序电压为 0。

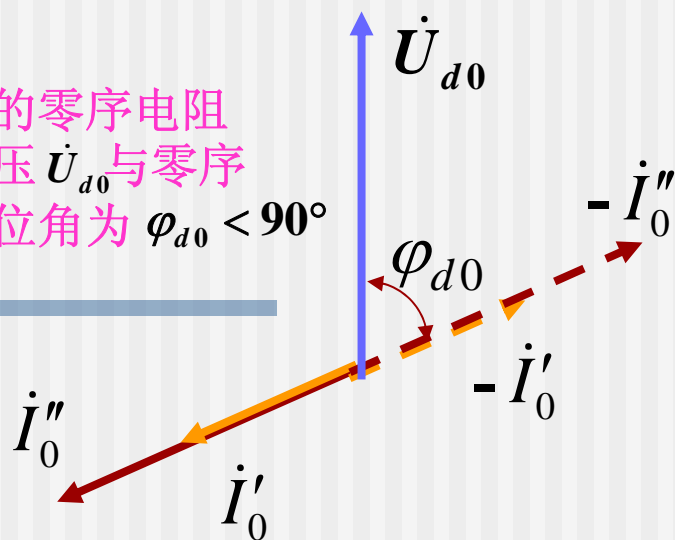


纯感性负荷电流
滞后电压 90°



忽略电阻时向量图

考虑线路中的零序电阻
时，零序电压 \dot{U}_{d0} 与零序
电流之间相位角为 $\varphi_{d0} < 90^\circ$



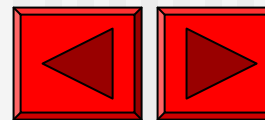
计及电阻时向量图

➤ 零序电流

零序电流只在故障点与中性点接地的变压器之间流动，并由大地构成回路。**零序电流比正序、负序电流流动范围少。**

当忽略回路的电阻时， \dot{I}'_0 和 \dot{I}''_0 超前 \dot{U}_{d0} 为 90° ，当计及电阻时，设零序阻抗角 $\varphi_{d0} = 80^\circ$ ，则 \dot{I}'_0 和 \dot{I}''_0 超前 \dot{U}_{d0}

为 $180^\circ - \varphi_{d0}$ 。
 $i_0 = I_m \sin \omega t$ $u_0 = L i'_0$ 故 $-\dot{I}'_0$ 滞后 \dot{U}_{d0} 为 90°
 而 \dot{I}'_0 超前 \dot{U}_{d0} 为 90°



阻抗主要是变压器的感抗，零序电流的分布，主要决定于送电线路的零序阻抗和中性点接地变压器的零序阻抗，而与电源的数目和位置无关，当变压器 B_2 中性点不接地时，则 $I_2'' = 0$ 因为零序不构成回路。

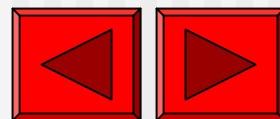
➤ 零序功率

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是由线路流向母线。

➤ 保护安装处

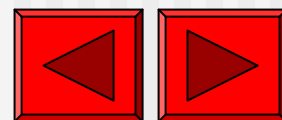
在保护安装处 $\dot{U}_{A0} = (-I_0') Z_{B1.0}$ ，零序电压与零序电流之间的相位差取决于变压器的零序阻抗角，而与保护线路的零序阻抗及故障点的位置无关。

但故障点离保护安装处愈远，流过保护安装处的零序电流愈小。



➤ 系统运行方式

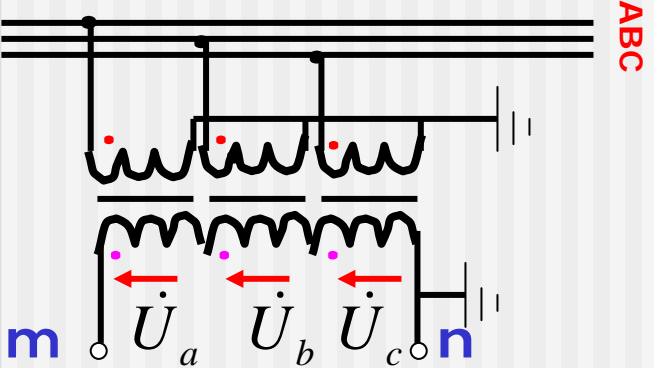
在电力系统运行方式变化时，只要送电线路和中性点接地的变压器数目不变，则零序阻抗和零序等效网络就是不变的，中性点接地的变压器数目越多，系统的零序阻抗越小，接地故障点的零序电流越大。



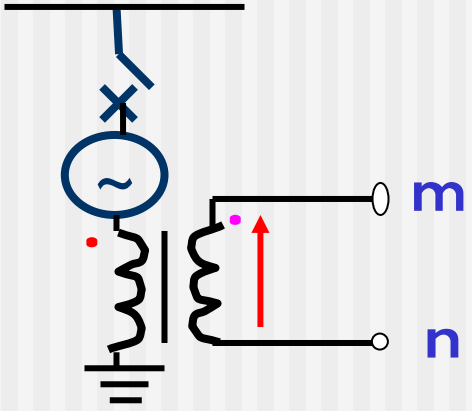
在微机保护中分为自产零序和过滤器零序两种

5. 零序电压过滤器

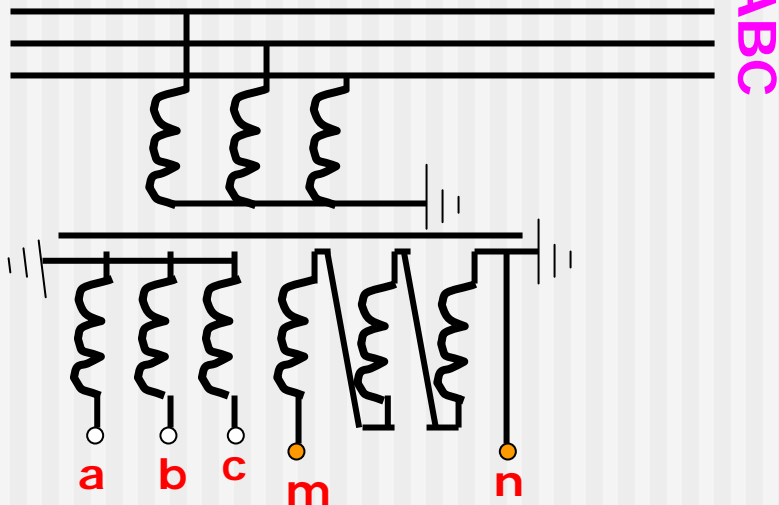
- 用三个单相式电压互感器



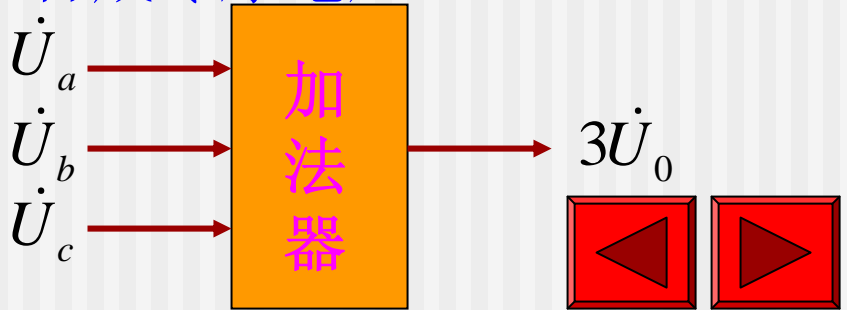
- 用接于发电机中性点的电压互感器



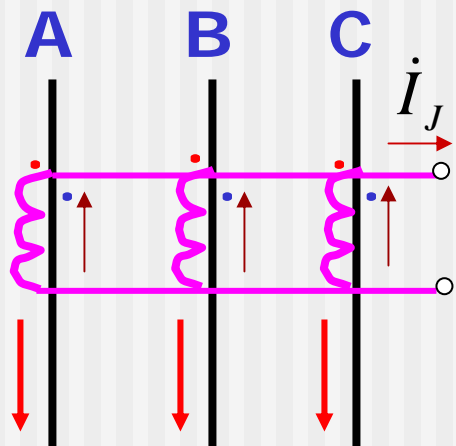
- 用三相五柱式电压互感器



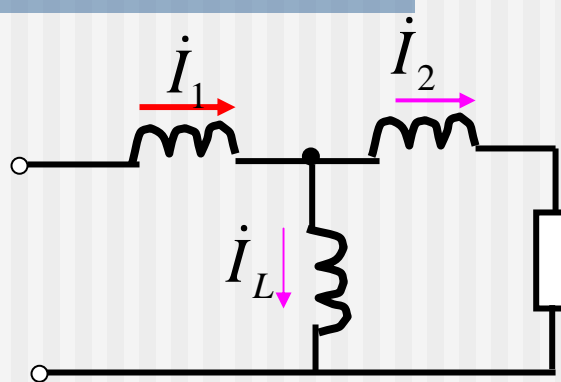
- 在集成电路保护装置内部合成零序电压



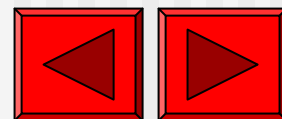
6. 零序电流互感器



零序电流过滤器



等效电路

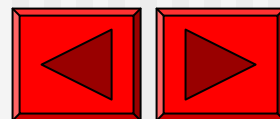


$$\dot{I}_J = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_0$$

一次电流中的一部分消耗
在绕组励磁上

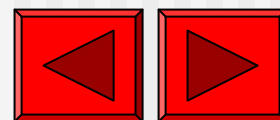
考虑励磁电流 \dot{I}_L 的影响后, $\dot{I}_2 = \frac{1}{n_\ell} (\dot{I}_1 - \dot{I}_L)$

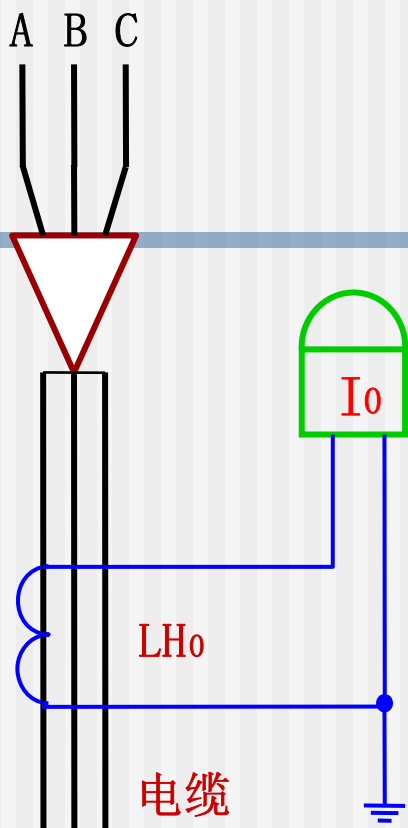
$$\dot{I}_J = \frac{1}{n_\ell} \left[(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) - (\dot{I}_{LA} + \dot{I}_{LB} + \dot{I}_{LC}) \right]$$



$$\dot{I}_{bp} = -\frac{1}{n_\ell} (\dot{I}_{LA} + \dot{I}_{LB} + \dot{I}_{LC})$$

称为零序电流过滤器的不平衡电流，当发生相间短路时，电流互感器一次侧流过的电流值最大，且包含有非周期分量，故不平衡电流也最大，以 $I_{bp \cdot \max}$ 表示。





零序电流互感器接线示意图

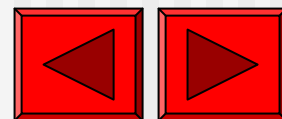
对于采用电缆引出的送电线路，还广泛地采用了零序电流互感器的接线以获得 $3I_0$ ，此电流互感器就套在电缆的外面，从其铁芯中穿过的电缆就是其一次绕组，这个互感器的一次电流就是 $I_A + I_B + I_C$ ，只当一次侧有零序电流时，在互感器的二次侧才有相应的 $3I_0$ 输出，故称它为零序电流互感器。采用零序电流互感器的优点，和零序电流过滤器相比，主要的是没有不平衡电流，同时接线也更简单。

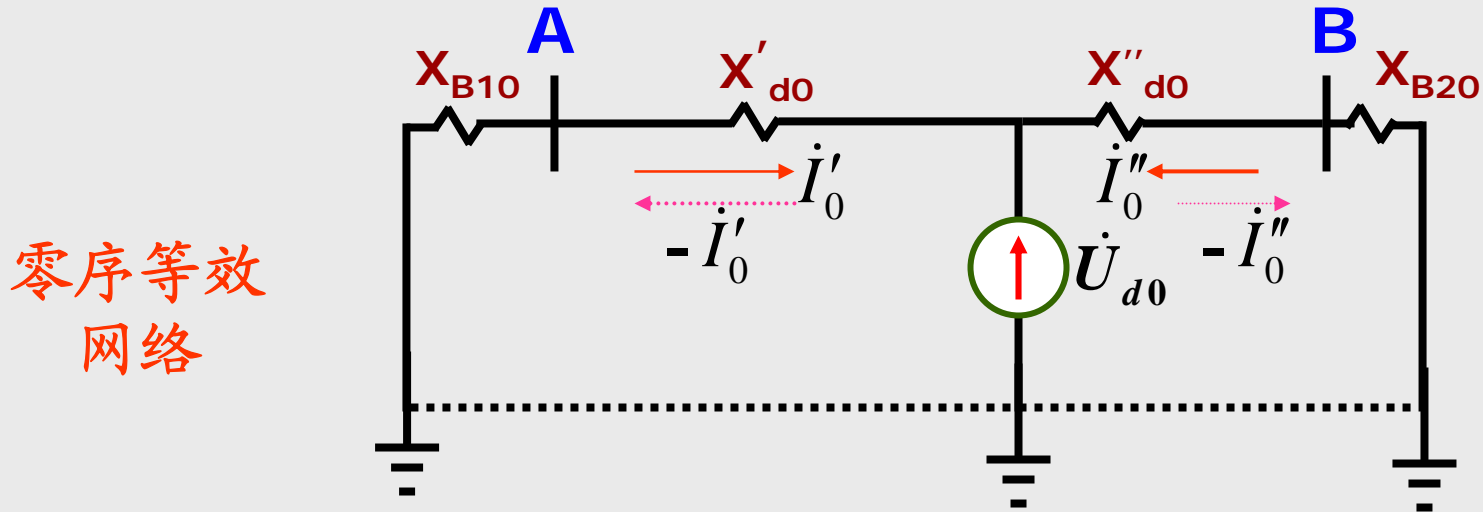
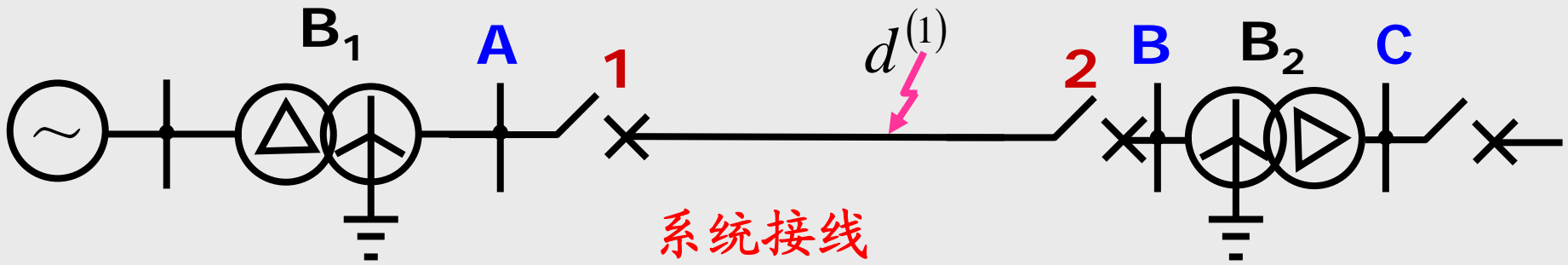
7. 零序电流速断（零序 I 段）保护

整定原则：

- 1) 躲开相邻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 $3I_{0\cdot\max}$ ，引入可靠系数 $K'_K (1.2 \sim 1.3)$
$$I'_{dz} = K'_K \cdot 3I_{0\cdot\max}$$

在确定最大零序电流时，要考虑使零序电流为最大的运行方式和接地故障类型。即应考虑系统正序阻抗 Z_1 为最小，保护安装侧变压器中性点接地数目最多，而线路末端变压器中性点接地数目最小或都不接地的情况。





若母线A还接有中性点接地的变压器，则零序阻抗变小，零序电流增大。

B2中性点接地:

$$3I'_0 = 3I_0 \frac{X''_{d0} + X_{B20}}{X'_{d0} + X_{B10} + X''_{d0} + X_{B20}}$$

$$3I''_0 = 3I_0 \frac{X'_{d0} + X_{B10}}{X'_{d0} + X_{B10} + X''_{d0} + X_{B20}}$$

B2中性点不接地:

$$3I'_0 = 3I_0$$

$$3I''_0 = 0$$

至于是单相接地短路时的 $3I_0^{(1)}$ 大，还是两相接地短路时的 $3I_0^{(1,1)}$ 大，
 可比较 $X_{1\Sigma}$ 和 $X_{0\Sigma}$ ，若 $X_{1\Sigma} > X_{0\Sigma}$ ，则 $3I_0^{(1,1)} > 3I_0^{(1)}$
 若 $X_{1\Sigma} < X_{0\Sigma}$ ，则 $3I_0^{(1)} > 3I_0^{(1,1)}$ 。因为在 $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma}$ 的条件下：

单相接地短路的零序电流为：

$$3I_0^{(1)} = \frac{3E}{2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

两相接地短路的零序电流为：

$$3I_0^{(1,1)} = \frac{3E}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}}$$

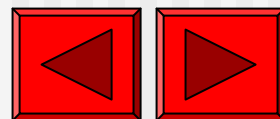
单相接地

$$I_0 = \frac{\dot{E}_\Sigma}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

\dot{E}_Σ 故障点的等效零序电势

$X_{1\Sigma}$ $X_{2\Sigma}$ $X_{0\Sigma}$

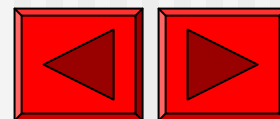
故障点的等效正序，负序，零序阻抗



- 2) 躲开断路器三相触头不同期合闸时所出现的最大零序电流 $3I_{0.bt}$ ，引入可靠系数 $K'_K (1.2 \sim 1.3)$

$$I'_{dz} = K'_K \cdot 3I_{0.bt}$$

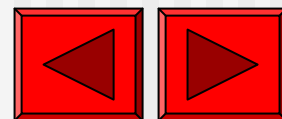
$3I_{0.bt}$ 的计算，一相先合与两相断线情况类同，两相先合与一相断线情况类同。



若保护装置动作时间大于断路器三相不同期合闸的时间，则可不考虑这一条件，若考虑则整定值应选取其中较大者。

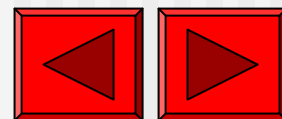
$$I'_{dz} = \max(K'_k 3I_{0\cdot\max}, K'_k 3I_{0\cdot bt})$$

- 3) 当线路上采用单相自动重合闸时，要求最小保护范围不少于线路全长的**15%**，按上述（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，而若按这一条件整定，则正常情况下发生接地故障时，其保护范围又要缩小，不能充分发挥零序 I 段的作用。



为了解决这个矛盾，设置两个零序 I 段，一个按条件 1 或 2 整定（定值小，保护范围大，称为灵敏 I 段），其主要任务是对全相运行状态下的接地故障起保护作用，而当单相自动重合闸时，重合期间将自动闭锁，待恢复全相运行时才能重新投入；另一个是按照条件

（3）整定（定值大，称为不灵敏 I 段），主要作用是在单相重合闸过程中，其它两相又发生接地故障时，用以弥补失去灵敏 I 段的缺陷



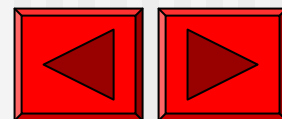
8. 零序电流限时速断（零序 II 段）保护

保护范围不超出相邻下一条线路零序 I 段的保护范围

- 1) 零序 II 段整定其起动电流首先考虑和下一条线路的零序 I 段相配合，并带有一个 Δt 的时限，以保证动作的选择性。

$$I''_{dz.2} = K''_k I'_{dz.1} \quad \text{时限为 } \Delta t \quad t''_2 = t'_1 + \Delta t$$
$$K''_k = 1.1 \sim 1.2$$

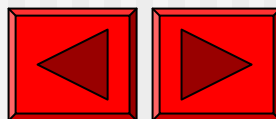
- 2) 当两个保护之间的变电所母线上接有中性点接地的变压器时，也将产生助增电流，引入零序电流的分支系数 K_{0fz} ，则零序 II 段的起动电流应整定为：



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

3) 零序 II 段灵敏系数:

$$K_{lm} = \frac{\text{本线路末端接地短路时最小零序电流}}{I''_{dz}} \geq 1.5$$



9. 零序过电流（零序III段）保护

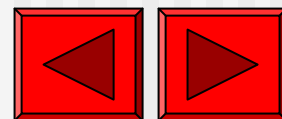
————— 作为接地保护的后备

- 1) 在零序过电流保护中，起动电流的整定原则上按照躲开相邻下一条线路出口处相间短路时零序互感器出现的最大不平衡电流 $I_{bp\cdot\max}$ 来整定，引入可靠系数 K_k ，则

$$I_{dz\cdot J}''' = K_k I_{bp\cdot\max} \quad \text{二次侧}$$

(2 ~ 4 A) 二次侧

零序过电流保护动作电流



2) 同时要求各保护之间在灵敏系数上要互相配合, 本保护零序Ⅲ段的保护范围不能超出相邻线路零序Ⅲ段, 当两个保护之间具有分支电路时, 起动电流应按如下整定:

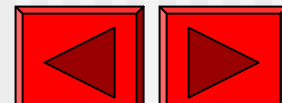
$$I_{dz \cdot 2}''' = \frac{K_k}{K_{0 \cdot fz}} I_{dz \cdot 1}'''$$

K_k : 可靠系数1.1~1.2

$K_{0 \cdot fz}$: 在相邻线路的零序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

$$\text{近后备 } K_{lm近} = \frac{\text{本线路末端接地短路最小零序电流 } 3I_{0 \cdot \min}}{I_{dz}'''} \geq 1.3 \sim 1.5$$

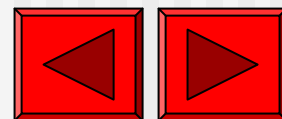
$$\text{远后备 } K_{lm远} = \frac{\text{相邻下一条线路末端最小零序电流 } 3I_{0 \cdot \min}}{I_{dz}'''} \geq 1.2$$



□评价

优点:

- a. 相间短路的过电流保护是按照大于负荷电流 $I_{fh. max}$ 来整定，继电器的起动电流一般大于 $5 \sim 7 A$ ，而零序过电流保护则按照躲开不平衡电流的原则整定，其值一般为 $2 \sim 3 A$ ，由于发生单相接地短路时，故障相的电流与零序电流 $3I_0$ 相等，故零序过电流保护的灵敏性高。
- b. 零序电流保护受系统运行方式变化的影响小，且在线路始端与末端短路时，零序电流变化显著，故零序 I 段的保护范围较大，也较稳定。



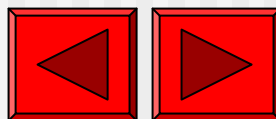
c. 当系统中发生某些不正常运行状态时（如系统振荡，短时过负荷等）零序保护不受影响。

d. 在110kV及以上的高压或超高压系统中，单相接地故障占全部故障的70%~90%，而且其它故障也往往是由单相接地引起的，故采用零序保护具有显著的优越性。

缺点:

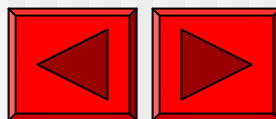
a. 对于短线路或运行方式变化很大的情况，保护往往不能满足系统运行所提出的要求。

b. 随着单相重合闸的广泛应用，在重合闸过程中将出现非全相运行状态，再考虑系统两侧的电机发生摇摆，则可能出现较大的零序电流，因而影响零序电流保护的正确工作。



- c. 当采用自耦合变压器联系两个不同电压等级的网络时（例如110kV和220kV电网）则任一网络的接地短路均将在另一网络中产生零序电流，这将使零序保护的整定配合复杂化，并将增大零序III段的动作时限。

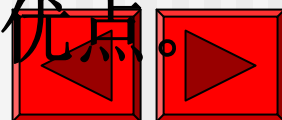
在中性点直接接地的电网中，由于零序电流保护简单、经济、可靠，故得到广泛应用。



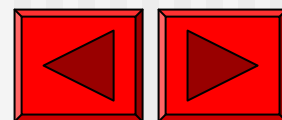
第四节 中性点非直接接地电网中单相接地故障的保护

中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点经电阻接地等电网，统称为中性点非直接接地电网。

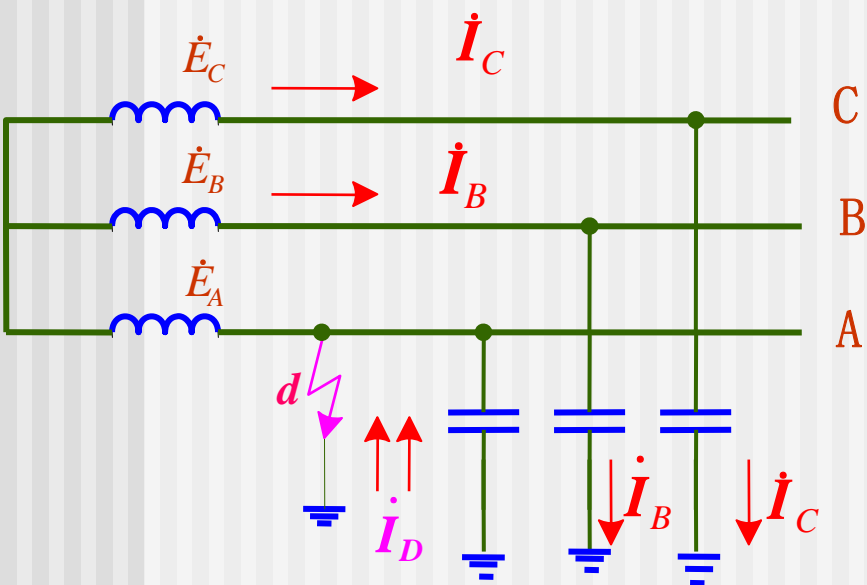
在中性点非直接接地电网（又称小接地电流系统）中发生单相接地时，由于故障点电流很小，而且三相之间的线电压仍然保持对称，对负荷的供电没有影响，因此，在一般情况下都允许再继续运行1~2小时。在此期间，其他两相的对地电压要升高 $\sqrt{3}$ 倍，为了防止故障进一步扩大成两点或多点接地短路，就应及时发出信号，以便运行人员查找发生接地的线路，采取措施予以消除，这也是采用中性点非直接接地运行的主要优点。



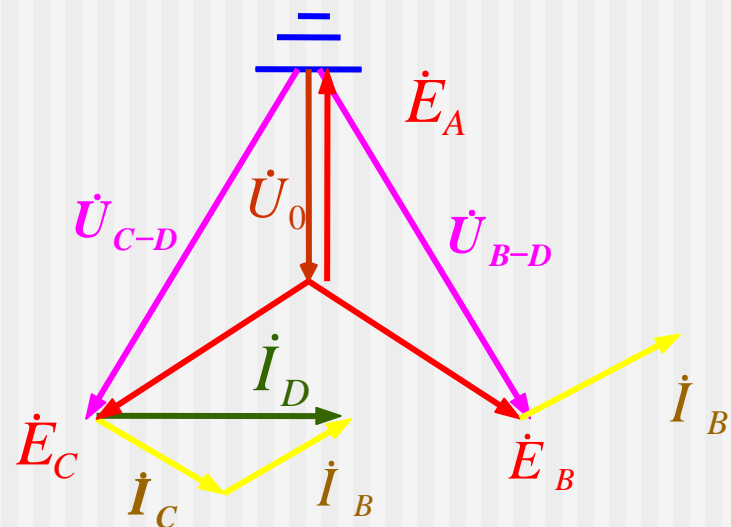
因此，在单相接地时，一般只要求继电保护能选出发生接地的线路并及时发出信号，而不必跳闸，但当单相接地对人身和设备的安全有危险时，则应动作于跳闸。能完成这种任务的保护装置有时被称作“接地选线装置”。



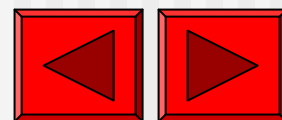
1. 中性点不接地电网单相接地故障的特点

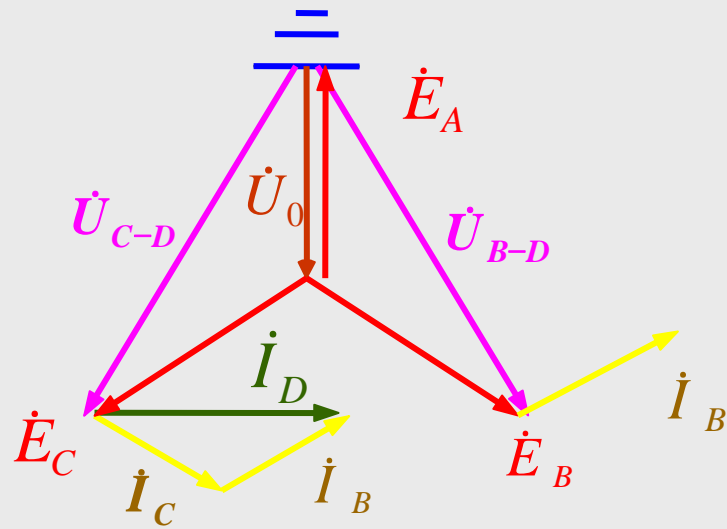
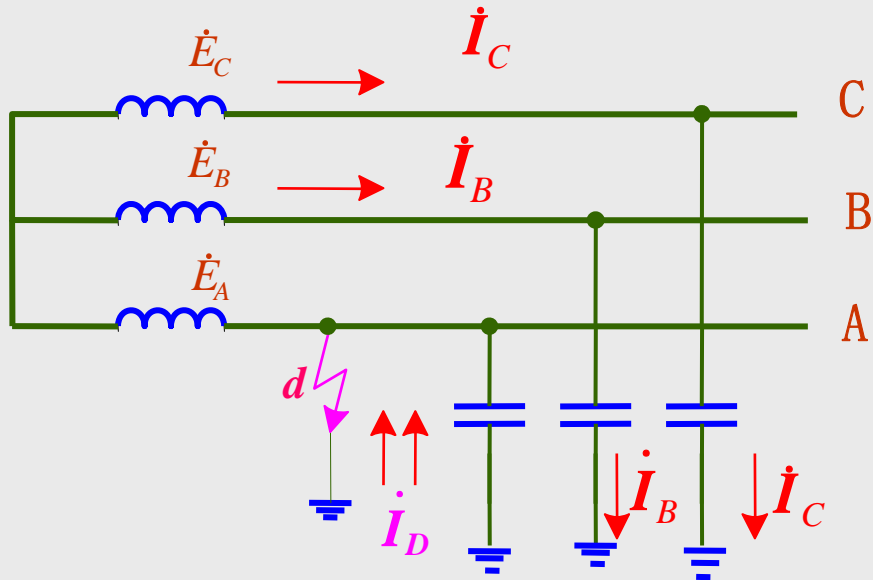


简单网络接线示意图

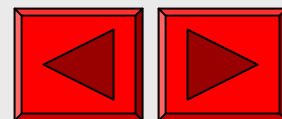


A相接地时的向量图





如图所示的最简单的网络接线，电源和负荷的中性点均不接地。在正常运行情况下，三相对地有相同的电容，在相电压的作用下，每相都有一超前于相电压的电容电流流入地中，而三相电流之和等于零。假设A相发生单相接地短路，则A相对地电压为零，对地电容被短接，而其他两相的对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，对地电容电流也相应增大 $\sqrt{3}$ 倍，相量关系如图所示。

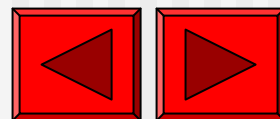


由于线电压仍然三相对称，三相负荷电流对称，相对于故障前没有变化，下面只分析对地关系的变化。在A相接地以后，忽略负荷电流和电容电流在线路阻抗上产生的电压降，各相对地的电压为：

$$\begin{cases} \dot{U}_{A-D} = 0 \\ \dot{U}_{B-D} = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ} \\ \dot{U}_{C-D} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{j150^\circ} \end{cases}$$

故障点d的零序电压为：

$$\dot{U}_{d0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{A-D} + \dot{U}_{B-D} + \dot{U}_{C-D}) = -\dot{E}_A$$



在非故障相中产生电容电流并流向故障点

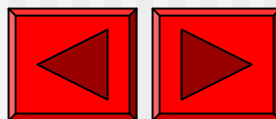
$$\begin{cases} \dot{I}_B = \dot{U}_{B-D} j\omega C_0 \\ \dot{I}_C = \dot{U}_{C-D} j\omega C_0 \end{cases}$$

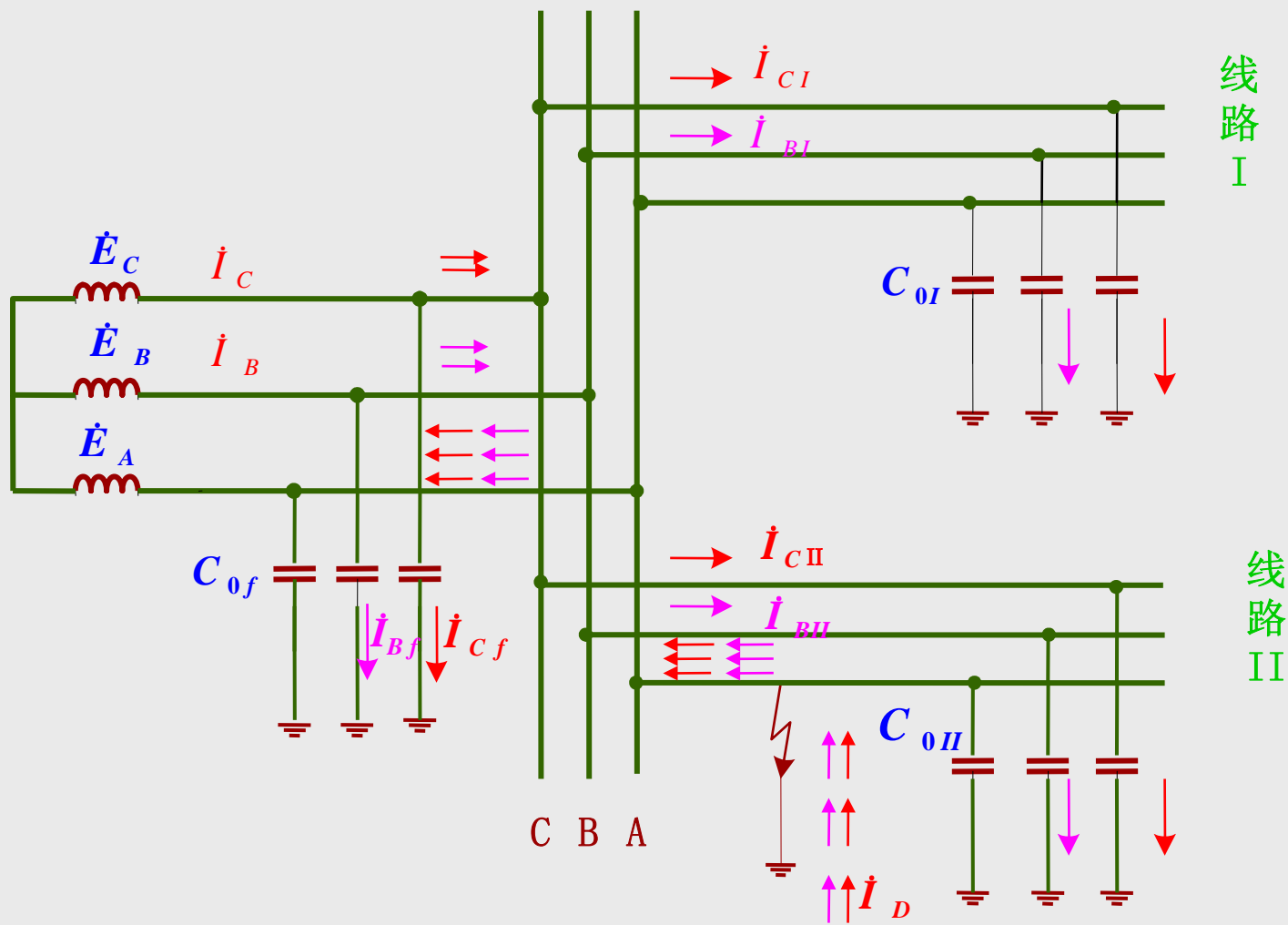
其有效值为 $I_B = I_C = \sqrt{3}U_\Phi \omega C_0$ ，式中 U_Φ 为相电压的有效值。

因为全系统A相对地的电压均等于零，因而各元件中A相对地的电容电流也等于零，此时，从A相接地点流回的电流是全系统非故障相电容电流之和

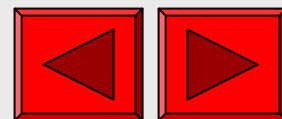
即：
$$\dot{I}_D = \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

其有效值为 $I_D = 3U_\Phi \omega C_0$ ，是正常运行时单相电容电流的三倍。





单相接地时，用三相系统表示的电容电流分布图



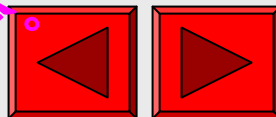
当网络中有发电机和多条线路存在时，每台发电机和每条线路对地均有电容存在，设以 C_{0f} , C_{0I} , C_{0II} 等集中的电容来表示，当线路 II A 相接地后，其电容电流分布在图中用“->”表示。在非故障的线路 I 上，A 相电流为零，B 相和 C 相中有本身的电容电流，因此，在线路始端所反应的零序电流为

$$3\dot{I}_{0I} = \dot{I}_{BI} + \dot{I}_{CI}$$

其有效值为 $3I_{0I} = 3U_{\phi}\omega C_{0I}$

非故障线路特点:

非故障线路中的零序电流为线路 I 本身的电容电流，电容性无功功率的方向为由母线流向线路。



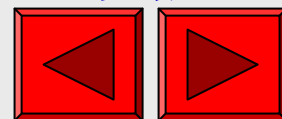
在发电机F上，首先有它本身的B相和C相的对地电容电流 \dot{I}_{Bf} 和 \dot{I}_{Cf} ，但是，由于它还是产生其它电容电流的来源，因此，从A相中要流回从故障点流上来的全部电容电流，而在B相和C相流出各线路上同名相的对地电容电流，此时从发电机出线端所反应的零序电流仍应为三相电流之和，由图可见，各线路的电容电流由于从A相流入后又分别从B相和C相流出了，因此，相加后互相抵消，而只剩下发电机本身的电容电流，故

$$3\dot{I}_{0f} = \dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf}$$

有效值为

$$3I_{0f} = 3U_{\phi} \omega C_{0f}$$

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，这个特点与非故障线路是一样的。



现在再来看看发生故障的线路 II，在B相和C相上，与非故障的线路一样流有它本身的电容电流 i_{BII} 和 i_{CII} ，而不同之处是在接地点要流回全系统B相和C相对地电容电流总和，其值为

$$\dot{I}_D = (\dot{I}_{BI} + \dot{I}_{CI}) + (\dot{I}_{BII} + \dot{I}_{CII}) + (\dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf})$$

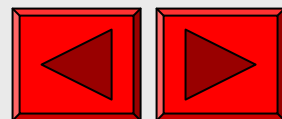
有效值 $I_D = 3U_\phi \omega (C_{0I} + C_{0II} + C_{0f}) = 3U_\phi \omega C_{0\Sigma}$

式中 $C_{0\Sigma}$ 为全系统每相对地电容的总和。此电流要从A相流回去，因此，从A相流出的电流可表示为

$$\dot{I}_{AII} = -\dot{I}_D$$

这样在线路 II 始端所流过的零序电流则为

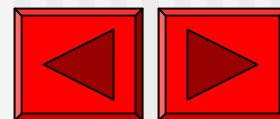
$$3\dot{I}_{0II} = \dot{I}_{AII} + \dot{I}_{BII} + \dot{I}_{CII} = -(\dot{I}_{BI} + \dot{I}_{CI} + \dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf})$$



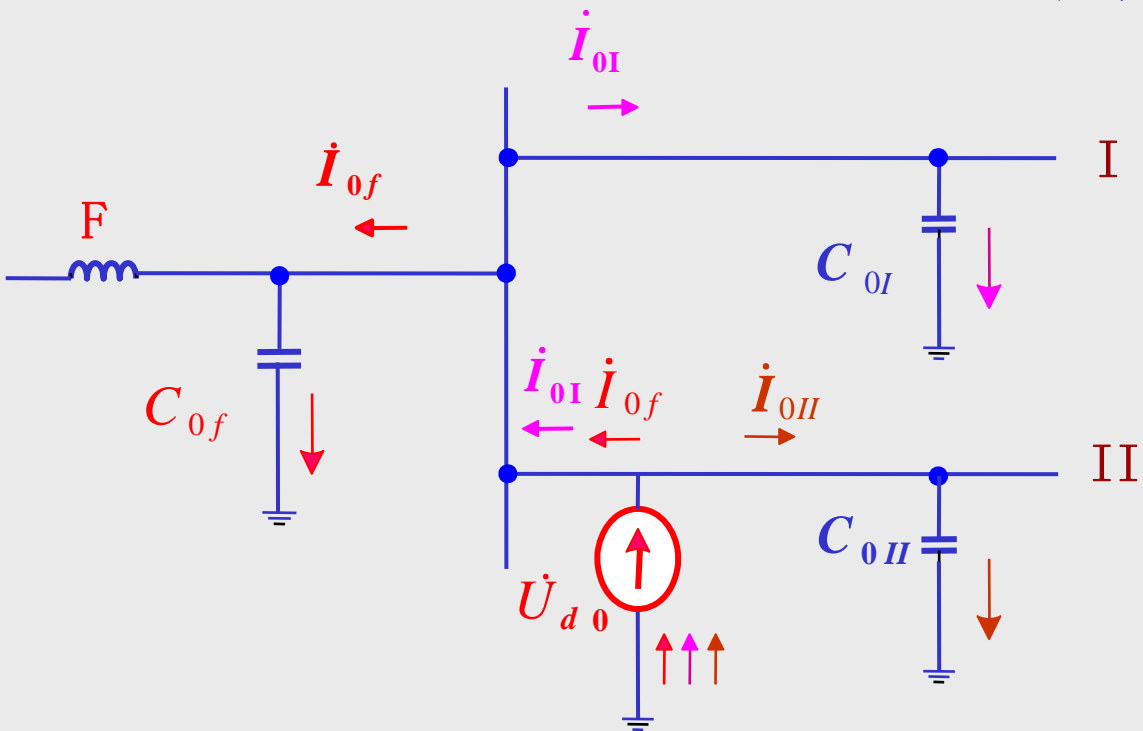
其有效值为 $3I_{0II} = 3U_{\phi}\omega(C_{0\Sigma} - C_{0II})$

故障线路的特点:

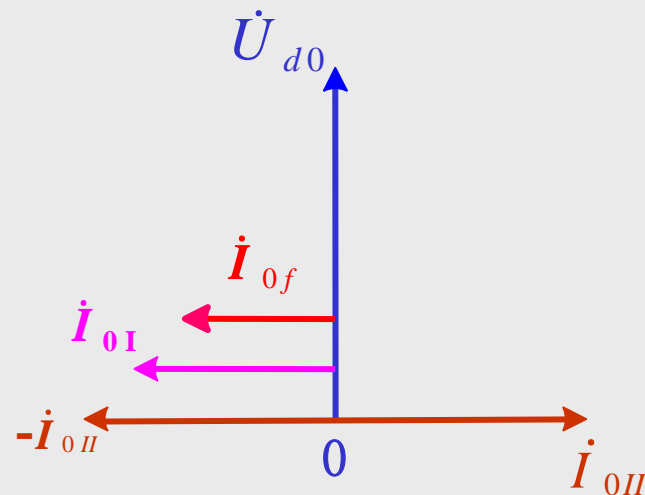
故障线路中的零序电流，其数值等于全系统非故障元件对地电容电流之总和（但不包括故障线路本身），其电容性无功功率的方向为由线路流向母线，恰好与非故障线路上的相反。



在接地点有一个零序电压，而零序电流的回路是通过各个元件的对地电容构成，由于送电线路的零序电阻远小于电容电阻，其向量关系如下图 (b) 所示 (图中 I_{0II} 表示线路 II 本身的零序电容电流)，这与直接接地电网是完全不同的。



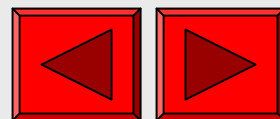
(a)



(b)

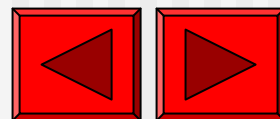
单相接地时的零序等效网络及向量图

(a) 等效网络; (b) 向量图



总结以上分析的结果，可以得出中性点不接地系统发生单相接地后零序分量分布的特点：

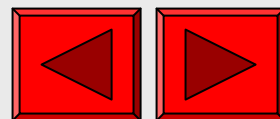
- 1) 零序网络由同级电压网络中元件对地的等值电容构成通路，与中性点直接接地系统由接地的中性点构成通路有极大的不同，网络的零序阻抗很大。
- 2) 在发生单相接地时，相当于在故障点产生了一个其值与故障相故障前相电压大小相等、方向相反的零序电压，从而全系统都将出现零序电压。
- 3) 在非故障元件中流过的零序电流，其数值等于本身的对地电容电流；电容性无功功率的实际方向为由母线流向线路。
- 4) 在故障元件中流过的零序电流，其数值为全系统非故障元件对地电容电流之总和；电容性无功功率的实际方向为由线路流向母线。

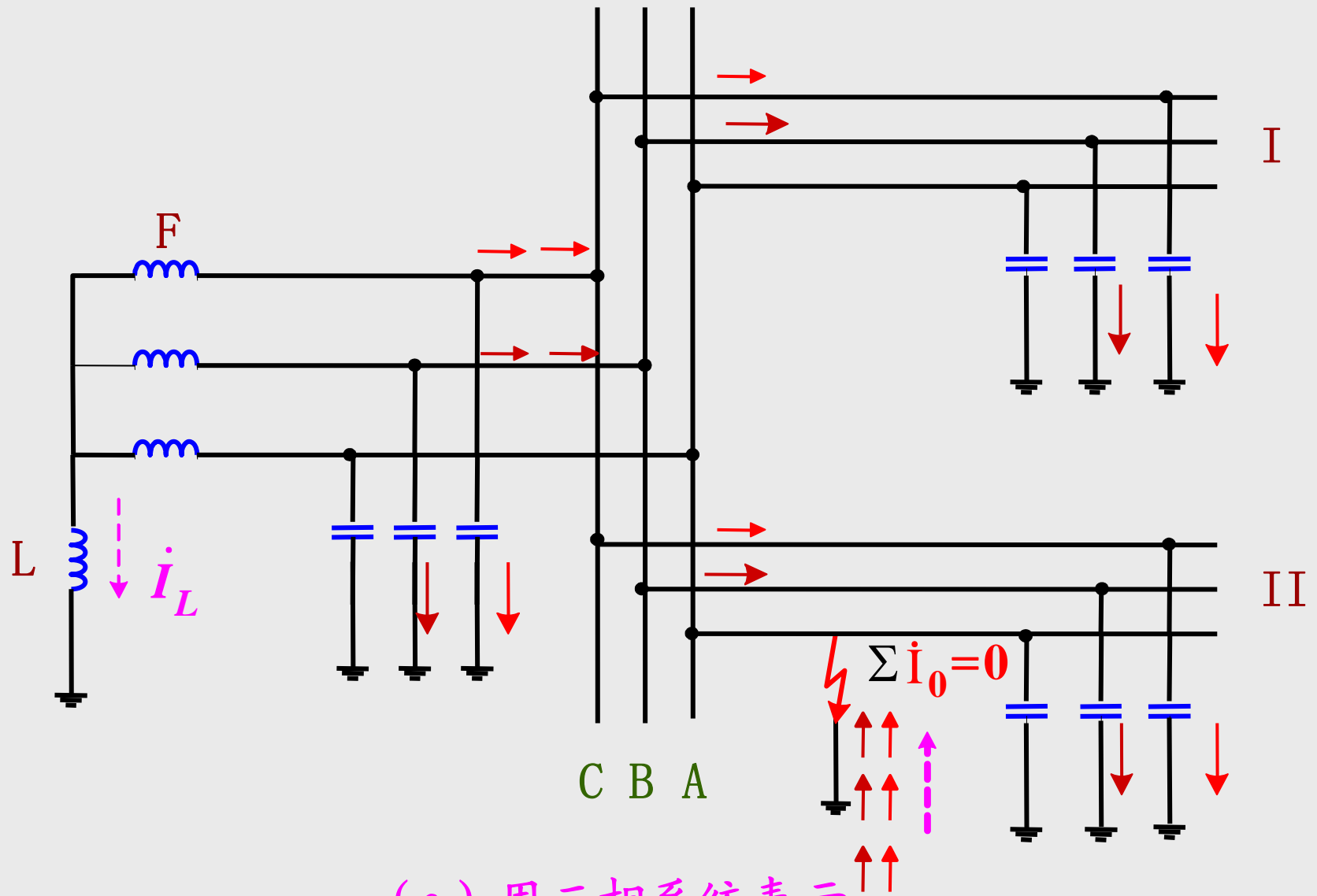


2. 中性点经消弧线圈接地电网中单相接地故障的特点

根据以上的分析，当中性点不接地电网中发生单相接地时，在接地点要流过全系统的对地电容电流，如果此电流比较大，就会在接地点燃起电弧，引起弧光过电压，从而使非故障相的对地电压进一步升高，使绝缘损坏，形成两点或多点的接地短路，造成停电事故。为了解决这个问题，通常在中性点接入一个电感线圈，这样当单相接地时，在接地点就有一个电感分量的电流通过，此电流和原系统中的电容电流相抵消，就可以减少流经故障点的电流，熄灭电弧，因此，称它为消弧线圈。

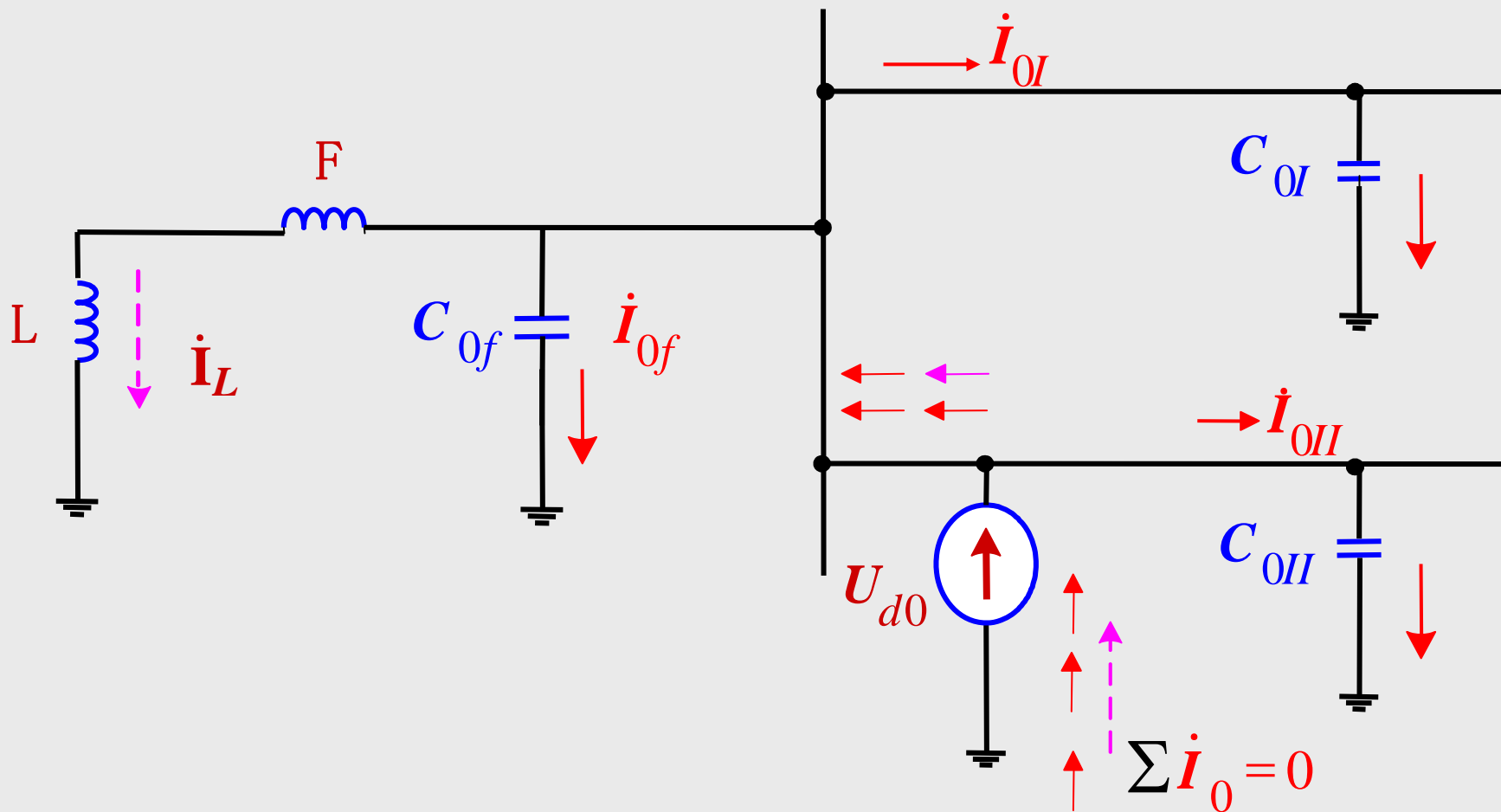
在各级电压网络中，当全系统的电容电流超过下列数值时，即应装设消弧线圈：对3~6kV电网——30A；10kV电网——20A；22~66kV电网——10A。





(a) 用三相系统表示

消弧线圈接地电网中，单相接地时的电流分布



(b) 零序等效网络

用电感电流抵消电容电流

消弧线圈接地电网中，单相接地时的电流分布

1) 单相接地的稳态特点

当采用消弧线圈以后，单相接地时的电流分布将发生重大的变化。假定在上述的网络中，在电源的中性点接入了消弧线圈，如图（a）所示，当线路II上A相接地以后，电容电流的大小和分布与不接消弧线圈时是一样的，不同之处是在接地点又增加了一个电感分量的电流 \dot{I}_L ，因此，从接地点流回的总电流为：

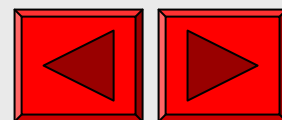
$$\dot{I}_D = \dot{I}_L + \dot{I}_{C\Sigma}$$

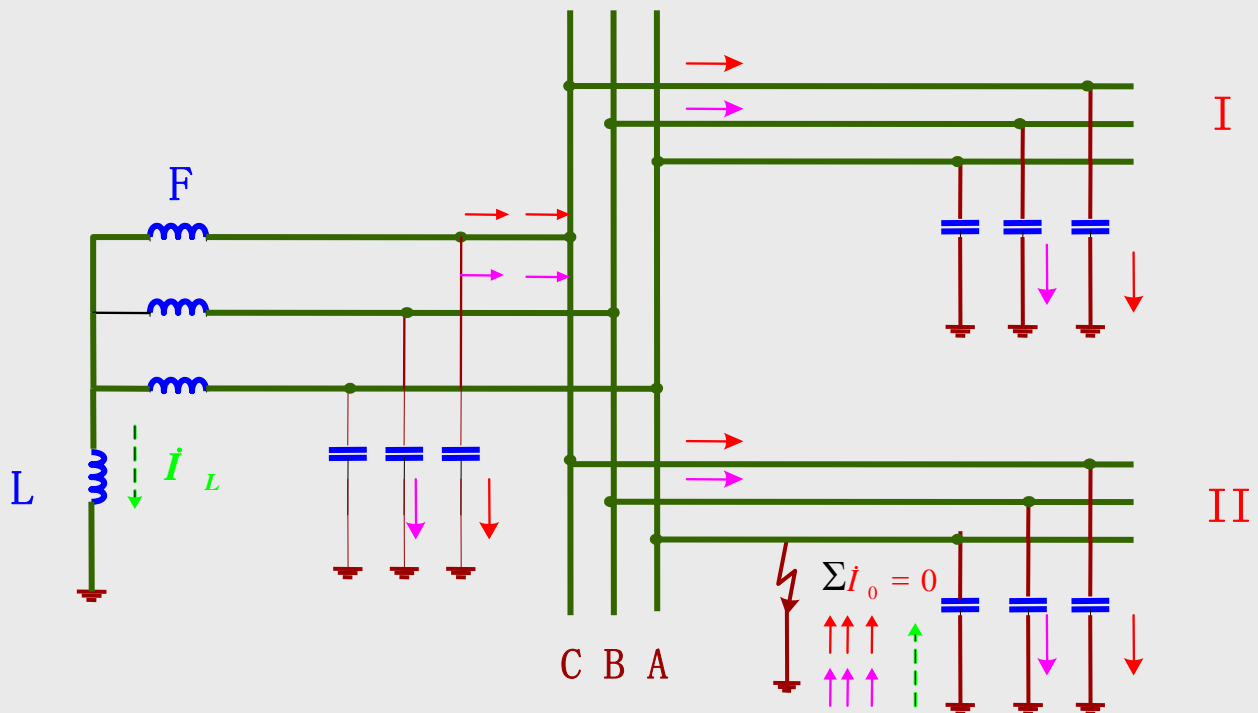
式中 $\dot{I}_{C\Sigma}$ — 全系统的对地电容电流

\dot{I}_L — 消弧线圈的电流，设用L表示它的电感，则

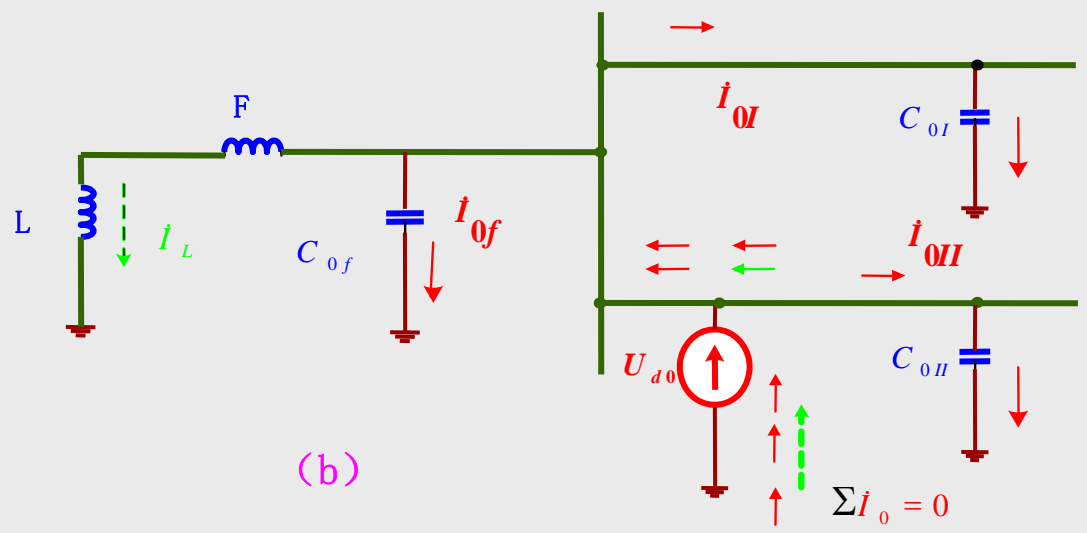
$$\dot{I}_L = \frac{-\dot{E}_A}{j\omega L}$$

由于 $\dot{I}_{C\Sigma}$ 和 \dot{I}_L 的相位大约相差 180° ，因此， \dot{I}_D 将因消弧线圈的补偿而减小。





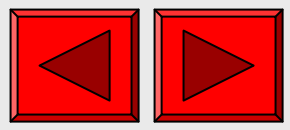
(a)



(b)

消弧线圈接地电网中，单相接地时的电流分布

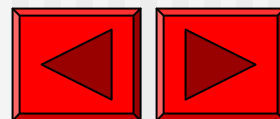
(a) 用三相系统表示； (b) 零序等效网络



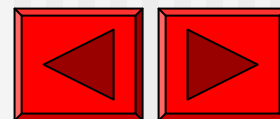
根据对电容电流补偿程度的不同，消弧线圈可以有完全补偿、欠补偿及过补偿三种补偿方式。

完全补偿：完全补偿就是使 $I_L = I_{C\Sigma}$ ，接地点的电流近似为0。从消除故障点的电弧，避免出现弧光过电压的角度来看，这种补偿方式是最好的，但是从运行实际来看，则又存在有严重的缺点。因为完全补偿时， $\omega L = \frac{1}{3\omega C_\Sigma}$ 正是电感L和三相对地电容 $3C_\Sigma$

50Hz交流串联谐振的条件。接地瞬间的非故障相谐振电压达到额定电压的7-8倍。



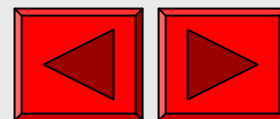
欠补偿: 欠补偿就是使 $I_L < I_{C\Sigma}$ ，补偿后的接地点电流仍然是电容性的。采用这种方式时，仍然不能避免上述问题的发生，因为当系统运行方式变化时，例如某个元件被切除或因发生故障而跳闸，则电容电流就将减小，这时很可能又出现 I_L 和 $I_{C\Sigma}$ 两个电流相等的情况，而又引起过电压，因此，欠补偿的方式一般也是不采用的。



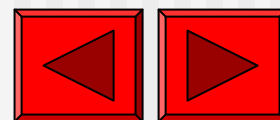
过补偿：过补偿就是使 $I_L > I_{C\Sigma}$ ，补偿后的残余电流是电感性的。采用这种方法不可能发生串联谐振的过电压问题，因此，在实际中获得了广泛的应用。 I_L 大于 $I_{C\Sigma}$ 的程度用过补偿度 P 来表示，其关系为

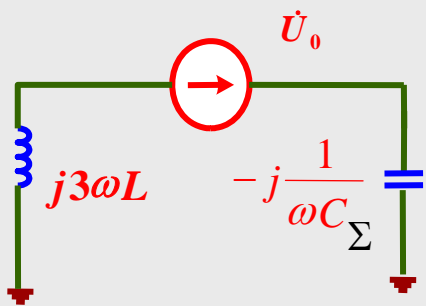
$$P = \frac{I_L - I_{C\Sigma}}{I_{C\Sigma}}$$

一般选择过补偿度 $P = 5\%-10\%$ ，而不大于 10% 。

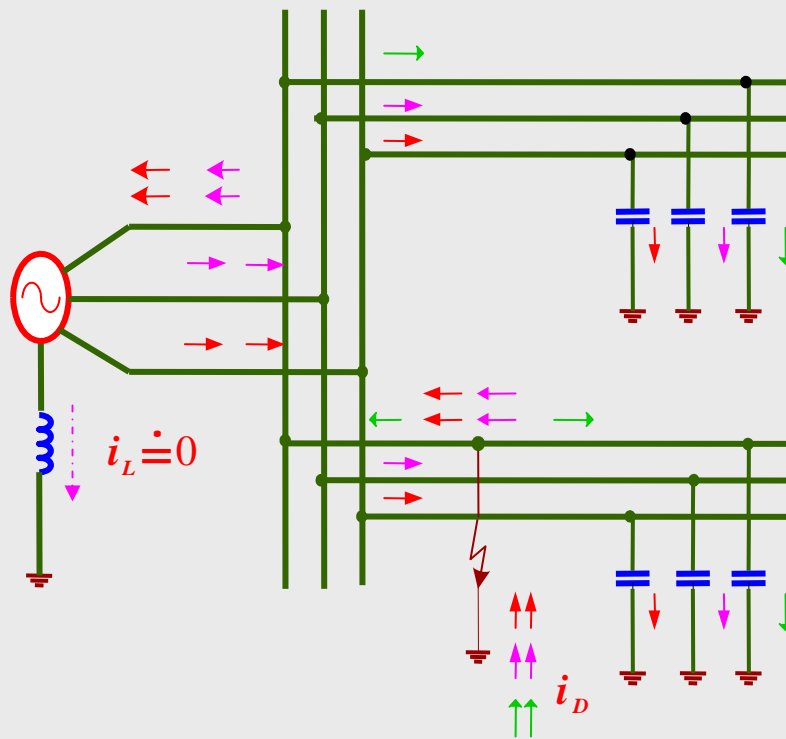


结论:当采用过补偿方式时，流经故障线路的零序电流是流过消弧线圈的零序电流与非故障元件零序电流之差，而电容性无功功率的实际方向仍然是由母线流向线路（实际上是电感性无功由线路流向母线），和非故障线路的方向一样。因此，在这种情况下，首先无法利用功率方向的差别来判别故障线路，其次由于过补偿度不大，因此，也很难像中性点不接地电网那样，利用零序电流大小的不同来找出故障线路。

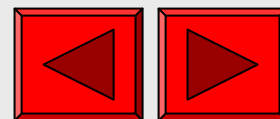




产生串联谐振的零序等效网络

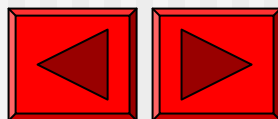


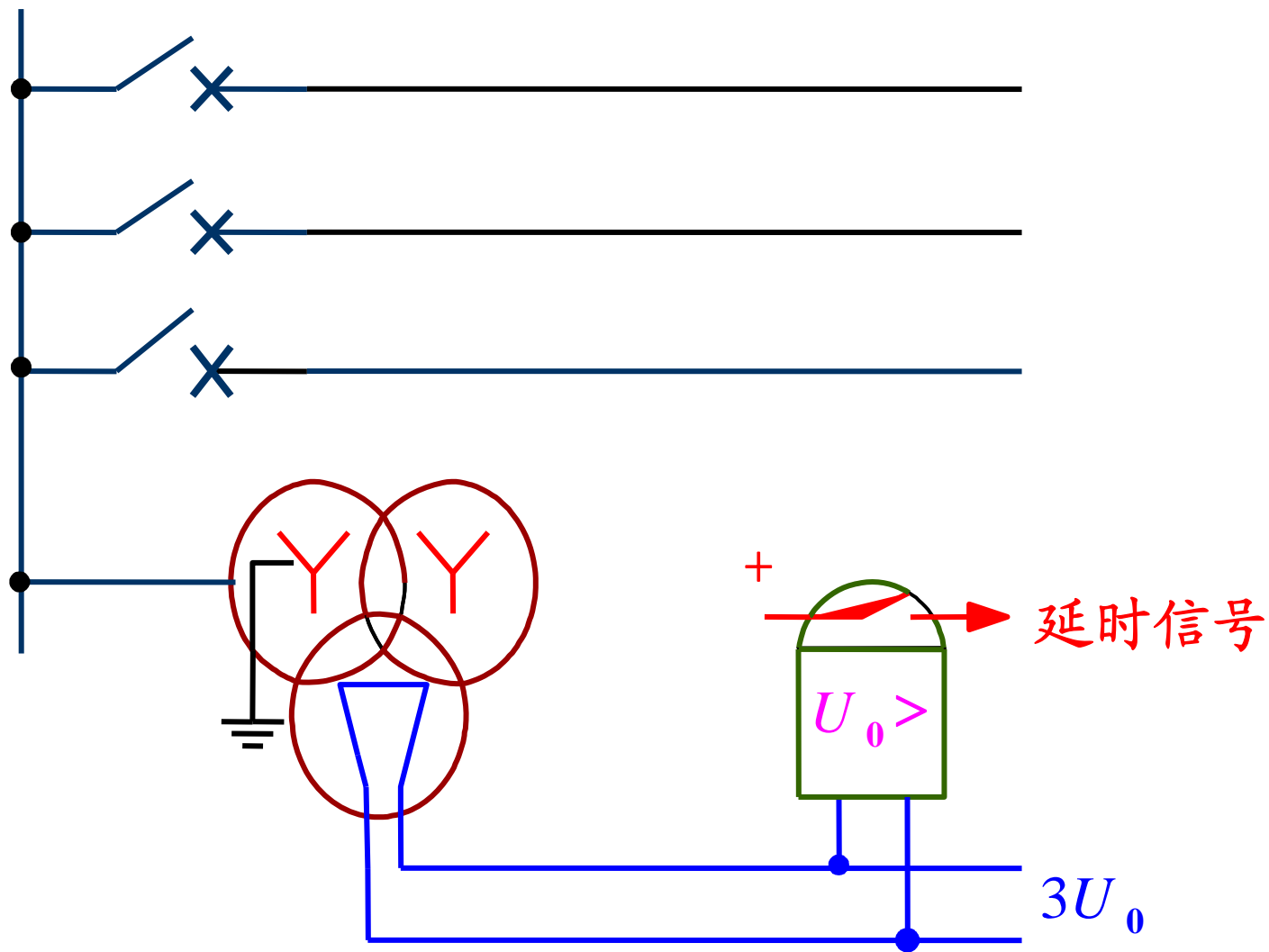
单相接地暂态电流的分布



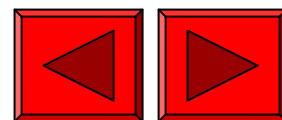
3. 零序电压保护

在中性点非直接接地系统中，只要本级电压网络中发生单相接地故障，则在同一电压等级的所有发电厂和变电所的母线上，都将出现数值较高的零序电压。利用这一特点，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，它利用接地后出现的零序电压，带延时动作于信号，表明本级电压网络中出现了单相接地。为此，可用一过电压继电器接于电压互感器二次接成开口三角形的一侧，因此，这种方法给出的信号是没有选择性的，要想发现故障是在哪条线路上，还需要由运行人员依次短时断开每条线路，并继之以自动重合闸，将断开线路投入。当断开某条线路时，零序电压的信号消失，即表明故障是在该线路上。





网络单相接地的信号装置原理接线图

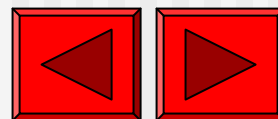


4. 零序电流和零序功率方向保护

零序电流保护

利用故障线路零序电流较非故障线路为大的特点来实现有选择性地发出信号或动作于跳闸。根据网络的具体结构和对电容电流的补偿情况，有时可以使用，有时难于使用。

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的不平衡电流的影响时，保护装置也可以接于三个电流互感器构成的零序回路中。



当某一线路上发生单相接地时，非故障线路上的零序电流为本身的电容电流，因此，为了保证动作的选择性，保护装置的起动电流应大于本线路的电容电流，

即：

$$I_{dz} = K_K 3U_\phi \omega C_0$$

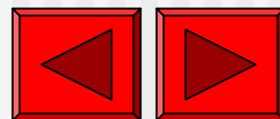
式中 C_0 为被保护线路每相的对地电容。

按上式整定以后，还需要校验在本线路上发生单相接地故障时的灵敏系数，由于流经故障线路上的零序电流为全网络中非故障线路电容电流的总和，因此灵敏系数为：

$$K_{lm} = \frac{3U_\phi \omega (C_\Sigma - C_0)}{K_K 3U_\phi \omega C_0} = \frac{C_\Sigma - C_0}{K_K C_0}$$

式中 C_Σ 为同一电压等级网络中，各元件每相对地电容之和。

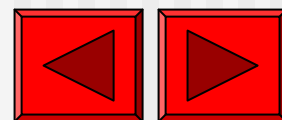
校验时应采用系统最小运行方式时的电容电流，也就是 C_Σ 为最小时的电容电流。



零序功率方向保护

利用故障线路与非故障线路零序功率方向不同的特点来实现有选择性的保护，动作于信号或跳闸。这种保护在中性点经消弧线圈过补偿工作方式时，难于适用。

直到目前为止，对于中性点非直接接地电网，还没有一种原理完善、动作可靠、实现简单的保护。随着对供电可靠性要求的提高，停电检修时间缩短、城市配电网环网供电和大量采用电缆，对迅速、有选择性的选出单相接地线路的要求日益紧迫，因而，对中性点非直接接地电网单相接地保护的研究仍然是一个重要的课题。



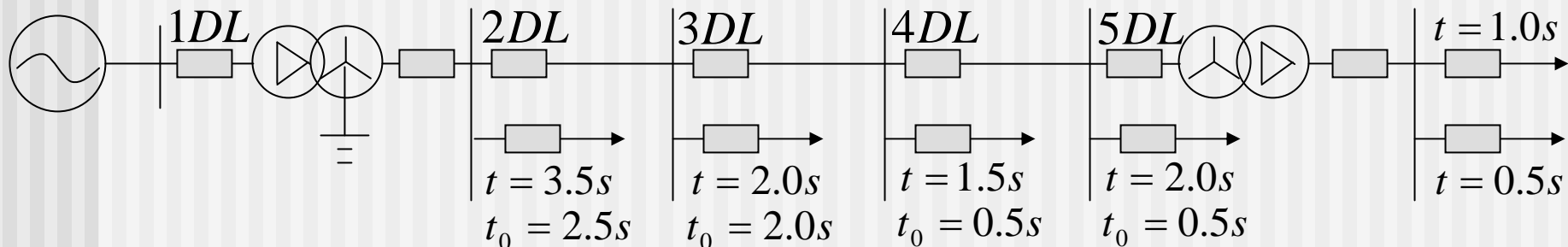
第二章习题

1、试比较在中性点直接接地电网中采用的三段式零序电流保护与对相间短路采用的三段式电流保护有何异同？

2、参看中性点直接接地系统零序电流保护的原理接线图，已知正常时线路上流过的一次负荷电流为450A，电流互感器变比为600/5，零序电流继电器的动作电流为3A，问：

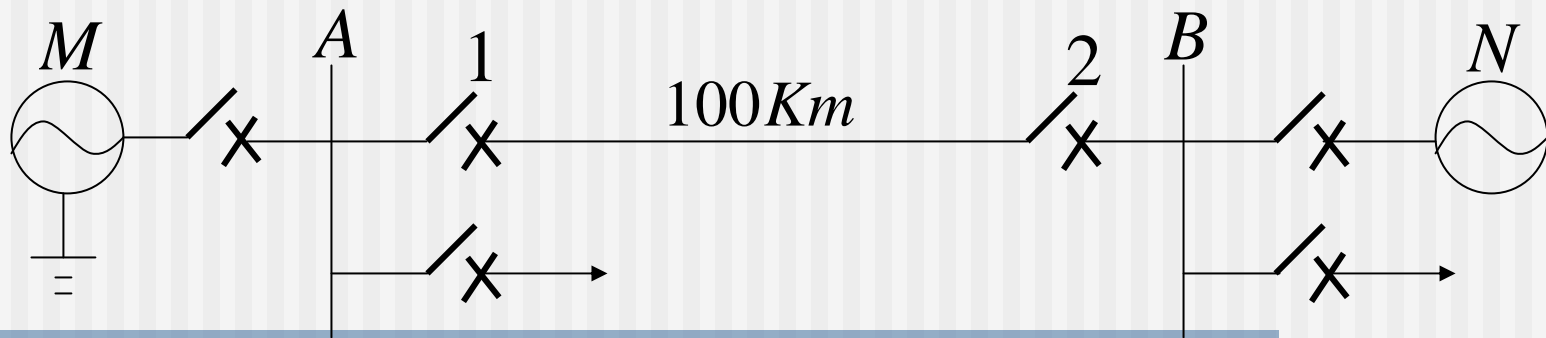
(1) 正常运行时，若电流互感器的极性有一个接反，保护会不会误动，为什么？

(2) 若零序电流过滤器的三个电流互感器中有一个互感器的二次侧断线，那么在正常负荷情况下，保护会不会误动，为什么？



3、如图所示电网中，拟定在断路器1DL~5DL上装设反应相间短路的过电流保护及反应接地短路的零序过电流保护，取 $\Delta t=0.5s$ ，试确定1DL~5DL：

- (1) 相间短路过电流保护的動作時限；
- (2) 零序過電流保護的動作時限；
- (3) 給出這兩種保護的時限特性。



4、图示两侧电源的线路中已知： $X_{b1} = X_{b2} = 0.4\Omega / Km$ ，
 $X_{b0} = 1.4\Omega / Km$ ， $E_M = E_N = 115 / \sqrt{3}KV$ ， $X_{1M} = X_{2M} = 10\Omega$ ，
 $X_{0M} = 8\Omega$ ， $X_{1N} = X_{2N} = 30\Omega$ ， $X_{0N} = 15\Omega$ ，

试求线路**AB**两侧零序电流速断保护**1**和**2**的整定值和保护范围。

$$I'_{0dz.1} = I'_{0dz.2} = 0.468KA \quad l_1\% = 94, l_2\% = 92$$

填空题:

2-1 瞬时电流速断的保护范围随_____和_____而变。

2-2 瞬时电流速断保护的的保护范围在被保护线路_____端，在_____运行方式下，保护范围最小。

2-3 本线路限时电流速断保护的的保护范围一般不超过相邻下一线路的_____保护的的保护范围，故只需带_____延时即保证选择性。

2-4 线路装设过电流保护一般是为了作本线路的_____及作相邻下一条线路的_____。

2-5 为使过电流保护在正常运行时不动作，其动作电流应大于_____，为使过电流保护在外部故障切除后能可靠返回，其返回电流应大于_____。

2-6 为保证选择性，过电流保护的动作时限应按_____原则整定，越靠近电源处的保护，动作时限越_____。

2-7 在Ⅲ段式电流保护中，电流Ⅰ段又称为_____保护，电流Ⅱ段又称为_____保护，电流三段又称为_____保护，并且由电流Ⅰ段和电流Ⅱ段的联合工作构成本线路的_____。

2-8 装有三段式电流保护的线路，其首端故障时，一般_____保护动作，末端故障时一般_____保护动作。

2-9 三段式电流保护中，最灵敏的是第_____段，因为_____。

2-10 已知返回系数，可靠系数，自启动系数，最大负荷电流，三段式电流保护Ⅲ段的整定电流=_____。根据整定公式，为了保护动作的可靠性。要求返回系数=_____。

2-11 在双侧电源网络中，方向性电流保护是利用判别短路功率的_____或电流、电压之间的_____关系，就可以判别发生故障的方向。

2-12 为了减少和消除死区，功率方向继电器通常采用_____接线方式，习惯上采用 $\alpha = 90^\circ - \varphi_d$ ， α 称为功率方向继电器的_____，要使功率方向继电器在各种相间短路情况下均能动作，应满足_____。当加入继电器电流端子上的电流为 \dot{I}_C 时，加入继电器的端子电压是_____；当加入继电器电流端子上的电流为 \dot{I}_B 时，加入继电器的端子电压是_____。

2-13 采用 90° 接线方式的 **LG-11** 型功率方向继电器，其内角时，该继电器的灵敏角 ϕ_{lm} 为_____，该继电器用于线路阻抗角 ϕ_d 为_____的线路上最灵敏。

2-14 有一采用 90° 接线方式的 **LG-11** 型功率方向继电器，用于阻抗角 $\phi_d = 55^\circ$ 的线路保护上，应选该功率方向继电器固有内角 α 为_____，该继电器的动作区为_____。

2-15 双侧电源网络中的限时电流速断保护，当分支电路中有电源时，要考虑_____的影响，当分支电路为一并联的线路时，要考虑_____的影响，因此在整定值中引入一个_____。

2-16 电力系统零序电流保护采用三相五柱式电压互感器，其二次绕组接成开口三角形，则开口三角形出口MN端子上电压 $\dot{U}_{MN} =$ _____，而零序电流过滤器 $\dot{I}_J = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c =$ _____。

2-17 中性点直接接地电网发生接地短路时，零序电流的大小和分布主要取决于变压器接地中性点的_____和_____。

2-18 中性点直接接地电网发生单相接地短路时，零序电压最高值应在_____处，最低值在_____处。

2-19 中性点直接接地电网中，零序保护的零序电流可以从_____取得，零序电压可以从_____取得。

2-20 三段式零序电流保护由瞬时零序电流速断保护、_____保护和_____保护组成。

2-21 零序电流速断保护与反应相间短路的电流速断保护比较，其保护区_____，而且_____；其灵敏性_____、动作时限_____。

2-22 中性点经消弧线圈接地根据补偿程度可分为_____、_____和_____三种方式，实际应用中都采用_____方式，其中 $P = \frac{I_L - I_{C\Sigma}}{I_{C\Sigma}}$ 称为_____，一般取 $P =$ _____。

选择题

2-23 电流速断保护的動作电流应大于-----。

- (A) 被保护线路末端短路时的最大短路电流;
- (B) 线路的最大负载电流;
- (C) 相邻下一线路末端短路时的最大短路电流。

2-24 电流速断保护的保護范围在-----运行方式下最小。

- (A) 最大;
- (B) 正常;
- (C) 最小。

2-25 双侧电源线路的电流速断保护为提高灵敏性，方向元件应装在-----。

- (A) 動作电流大的一侧;
- (B) 動作电流小的一侧;
- (C) 两侧。

2-26 若装有定时限过电流保护的线路，其末端变电所母线上有三条出线，各自的过电流保护动作时限分别为1.5s、0.5s、1s，则该线路过电流保护的时限应该定为-----

(A) 1.5s;

(B) 2s;

(C) 3.5s;

2-27 定时限过电流保护的動作電流需要考慮返回係數，是為了-----。

(A) 提高保护的灵敏性;

(B) 外部故障切除后保护可靠返回;

(C) 解决选择性。

2-28 装有三段式电流保护的线路，当线路末端短路时，一般由-----动作切除故障。

(A) 瞬时电流速断保护;

(B) 限时电流速断保护;

(C) 定时限过电流保护。

2-29 三段式电流保护中灵敏性最好的是-----。

- (A) I段;
- (B) II段;
- (C) III段。

2-30 三段式电流保护中,保护范围最小的是-----。

- (A) I段;
- (B) II段;
- (C) III段。

2-31 有一段线路,拟定采用两段式电流保护,一般采用三段式电流保护中的-----。

- (A) I、II段;
- (B) I、III段;
- (C) II、III段。

2-32 双侧电源线路的过电流保护加方向元件是为了-----。

- (A) 解决选择性;
- (B) 提高灵敏性;
- (C) 提高可靠性。

2-33 双侧电源电网中、母线两侧方向过电流保护的方向元件-----可以省略。

- (A) 该保护的时限较长时;
- (B) 该保护的时限较短时;
- (C) 两侧保护的时限相等时。

2-34 考虑助增电流的影响，在整定距离保护II段的动作阻抗时，分支系数应取-----

- (A) 大于1, 并取可能的最小值
- (B) 大于1, 并取可能的最大值
- (C) 小于1, 并取可能的最小值。

2-35 在中性点直接接地电网中，发生单相接地短路时，故障点零序电流和零序电压的相依关系是-----。

(A) 电流超前电压约 90° ；

(B) 电压超前电流约 90° ；

(C) 电压电流同相位。