国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

继电保护培训教材

国家电力调度通信中心　编著

（上册）

电力建设论坛
ELECTRIC POWER CONSTRUCTION
COPYRIGHT (C) HTTP://BBS.DIANJIAN.NET

中国电力出版社

更多专业资料请访问电建论坛

国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司
继电保护培训教材（上册）

电力建设论坛
ELECTRIC POWER CONSTRUTION
COPYRIGHT (C) HTTP://BBS.DIANJIAN.NET

《国家电网公司继电保护培训教材》

编　委　会

主　任：张智刚

副主任：李明节　陈国平　王玉玲

主　编：高中德　舒治淮　王德林

编　委：许正亚　支叶青　周丽芳　王　芊　傅洪全
胡晓丽　姜　瑾　刘正梅　曹　良　廖小君
杨先义　薛　峰　陈建民　孙集伟　韩学军
邱金辉　严国平　裘愉涛　张　洪　姚　旭
徐宇新　王　伟　倪腊琴

$$c=\sqrt{a^2+b^2}$$

$$\theta=\arctan\frac{b}{a}$$

由数学中的欧拉公式：

$$\cos\theta+\mathrm{j}\sin\theta=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta}$$

可得相量用复数表示的四种形式：

$$\dot{A}=a+\mathrm{j}b=c(\cos\theta+\mathrm{j}\sin\theta)=c\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta}=c\angle\theta^{\circ} \tag{1-5}$$

它们依次分别称为复数的代数式、三角式、指数式和极坐标式。复数在加减运算时宜采用代数式，实部与实部相加减，虚部与虚部相加减；在乘除运算时宜采用指数式和极坐标式，模与模相乘除，幅角与幅角相加减。

例1-2 已知 $i_1=28.28\sin(314t+60°)$ A，$i_2=14.14\sin(314t-45°)$ A。

试求：① i_1、i_2 的相量表示；② 求 i_1+i_2；③ 画出相量图。

解：（1）i_1、i_2 的相量表示：

$$\dot{I}_1=\frac{28.28}{\sqrt{2}}\angle+60°=20\angle+60°\ \mathrm{A};\quad \dot{I}_2=\frac{14.14}{\sqrt{2}}\angle-45°=10\angle-45°\ \mathrm{A}$$

（2）i_1+i_2：

$$\begin{aligned}\dot{I}_1+\dot{I}_2&=20\angle+60°+10\angle-45°\\&=10+\mathrm{j}17.32+7.07-\mathrm{j}7.07\\&=17.07+\mathrm{j}10.25=19.91\angle+30.98°\ \mathrm{A}\end{aligned}$$

数学表达式为：

$$i_1+i_2=\sqrt{2}\times19.91\sin(314t+30.98°)\mathrm{A}$$

（3）相量图如图1-4所示。

由相量图清晰可见各电流的相位差。

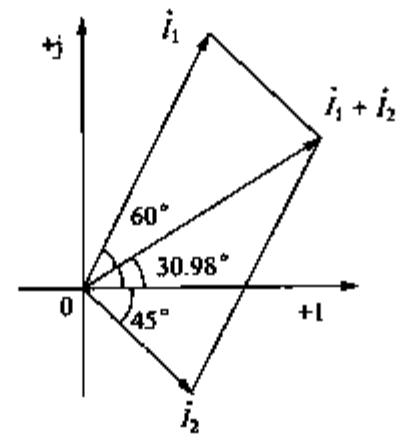


图1-4 例1-2相量图

三、单一元件的交流电路

知道了交流电的基本概念及相量表示法后，以下讨论只含一个理想无源元件、最简单的交流电路。

（一）纯电阻电路

1. 电压与电流的关系

在图1-5（a）所示电路中，设电压与电流参考方向一致，选择电流为参考量，即

$$i=I_m\sin\omega t$$

根据欧姆定律 $$u=Ri=RI_m\sin\omega t=U_m\sin\omega t$$

可见：

1）电阻上电压和电流为同频率的正弦量；

2）电阻上电压和电流相位一致；

3）电压和电流的最大值和有效值关系分别为

$$U_m=RI_m;\qquad U=RI \tag{1-6}$$

将电阻上电压和电流关系用相量来表示，则

$$\dot{U}_m=R\dot{I}_m;\qquad \dot{U}=R\dot{I} \tag{1-7}$$

波形图和相量图如图1-5（b）、（c）所示。

所示。根据电感元件的伏安特性：$u = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$，若选择电流为参考量 $i = I_m\sin\omega t$，则电压 $u = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = L\dfrac{\mathrm{d}I_m\sin\omega t}{\mathrm{d}t} = \omega LI_m\cos\omega t = U_m\sin(\omega t + 90°)$

可见：

1）电压与电流为同频率的正弦量；

2）相位上电压超前电流 90°，或电流滞后电压 90°；

3）电压有效值（最大值）与电流有效值（最大值）之间有类似欧姆定律的关系。即

$$\left.\begin{aligned} U_m &= \omega LI_m = X_L I_m \\ U &= \omega LI = X_L I \end{aligned}\right\} \tag{1-9}$$

其中

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \tag{1-10}$$

式中：X_L 称为电感的电抗，简称感抗，单位是欧姆（Ω）。电压一定时，X_L 越大，则电流越小，所以 X_L 是表示电感对电流阻碍作用大小的物理量。但要注意，电感对正弦电流的阻碍作用是由于自感电动势总是企图阻止交流电流变化形成的。

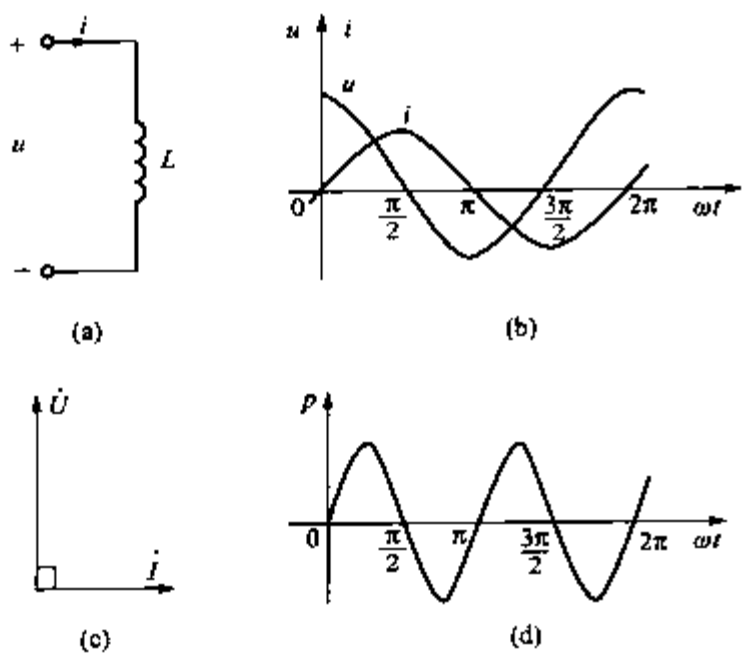


图 1－6　纯电感电路

（a）电路图；（b）电压电流波形；

（c）相量图；（d）功率波形

感抗 X_L 的大小与电感 L 和电源频率 f 成正比。当电感 L 一定时，感抗与频率 f 成正比，即 f 越高，X_L 越大，阻碍电流通过的能力越强，当 $f\to\infty$ 时，电感相当于开路。反之，f 越低，X_L 越小，阻碍电流通过的能力越弱，当 $f=0$（直流）时，$X_L=0$，电感相当于短路。所以电感元件具有“通低频、阻高频”的作用。

将电感上电压和电流关系用相量来表示，则

$$\left.\begin{aligned} \dot U_m &= \mathrm{j}X_L I_m = \mathrm{j}\omega L\dot I_m \\ \dot U &= \mathrm{j}X_L \dot I = \mathrm{j}\omega L\dot I \end{aligned}\right\} \tag{1-11}$$

波形图和相量图如图 1－6（b）、（c）所示。

2. 功率关系

（1）瞬时功率。

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m\sin(\omega t + 90°)I_m\sin\omega t = U_mI_m\cos\omega t\ \sin\omega t \\ &= UI\sin 2\omega t \end{aligned}$$

由上式看出瞬时功率也是时间的正弦函数，只是频率是电流（电压）频率的二倍。波形如图 1－6（d）所示。由图 1－6（b）、（d）可知，在第一个四分之一周期内，由于电压与电流为同方向，瞬时功率为正，电感吸收的电能转换成磁场能量储存在电感线圈中，它随电流增大而增加，当电流达到最大值时，其能量也达最大值为 $W_L = \dfrac{1}{2}LI_m^2$。在第二个四分之一周期内，电感电流与电压的实际方向相反，瞬时功率为负，在此期间电流下降，磁场能量减少，即电感中原先储存的磁场能量又返回给电源，到第二个四分之一周期结束，电流下降到零，电感中磁场能量全部放出。第三、第四个四分之一周期与第一个和第二个四分之一周

其中 φ 是端电压 u 与电流 i 之间的相位差。从电压三角形中得

$$\varphi = \arctan\frac{U_X}{U_R} = \arctan\frac{U_L - U_C}{U_R} \tag{1-26}$$

以上分析可见：

1）*RLC* 串联电路中，各电压和电流都是同频率的正弦量。

2）端电压的有效值（或最大值）与电流的有效值（或最大值）之间有类似欧姆定律的关系，即 $I=\frac{U}{|Z|}$，但要注意 $|Z|\neq\frac{u}{i}$。

3）各电压有效值（或最大值）之间不符合 KVL 定律，即 $U\neq U_R+U_L+U_C$。

4）端电压与电流之间的相位差就是电路的阻抗角 φ。如把阻抗三角形各边乘以电流有效值就可得电压三角形。

例 1－6 有 $R=30\Omega$，$L=127\text{mH}$ 的线圈与 $C=39.8\mu\text{F}$ 电容串联，接到电压为 220V、频率为 50Hz 的正弦交流电源上，试求通过线圈的电流、线圈电压及电容器上电压。

解： $X_L=2\pi fL=2\pi\times50\times127\times10^{-3}=40(\Omega)$

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\times50\times39.8\times10^{-6}}=80(\Omega)$$

$$Z=R+\mathrm{j}(X_L-X_C)=30+\mathrm{j}(40-80)=30-\mathrm{j}40=50\angle-53.1^\circ$$

以电源电压为参考相量 $\dot U=220\angle0^\circ\ (\text{V})$

则通过线圈的电流 $\dot I=\frac{\dot U}{Z}=\frac{220\angle0^\circ}{50\angle-53.1^\circ}=4.4\angle53.1^\circ\ (\text{A})$

线圈两端电压

$$\dot U=\dot I Z_{RL}=4.4\angle-53.1^\circ\times(30+\mathrm{j}40)=4.4\angle53.1^\circ\times50\angle53.1^\circ=220\angle106.2^\circ\ (\text{V})$$

电容上电压 $\dot U_C=-\mathrm{j}X_C\dot I=-\mathrm{j}80\times4.4\angle53.1^\circ=352\angle-36.9^\circ\ (\text{V})$

2. 电路的三种性质

RLC 串联电路中，电抗 X 的值不同时，电路呈现以下三种性质：

当 $X_L>X_C$，即 $X>0$ 时，$U_L>U_C$，表明感抗的作用大于容抗，$\varphi>0^\circ$，此时电压超前电流，电路呈电感性，相量图如图 1－12（a）所示。

当 $X_L<X_C$，即 $X<0$ 时，$U_L<U_C$，表明容抗的作用大于感抗，$\varphi<0^\circ$，此时电压滞后电流，电路呈电容性，相量图如图 1－12（b）所示。

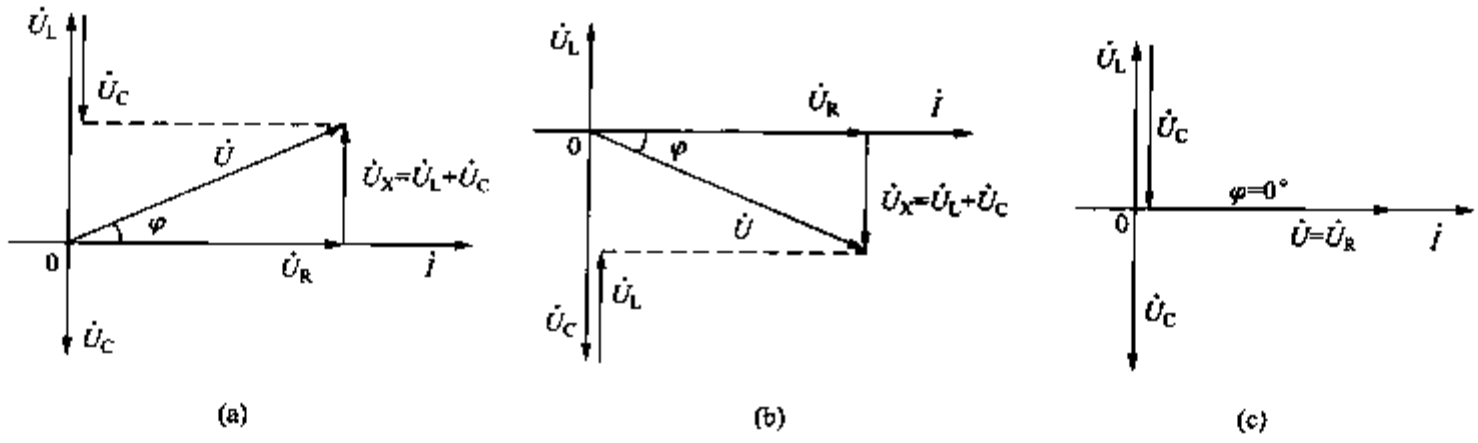


图 1－12 *RLC* 串联电路三种不同性质时的相量图

（a）电感性；（b）电容性；（c）电阻性

滞后电压 $\dot{U}$ 为 φ_1 角，此时 $\dot{I}=\dot{I}_L$ 也滞后 $\dot{U}$ 为 φ_1 角。并联电容后，电压 $\dot{U}$ 不变，电感性负载支路电流 $\dot{I}_L$ 不变，电容支路中电流 $\dot{I}_C$ 超前电压 $\dot{U}$ $\frac{\pi}{2}$。总电流 $\dot{I}=\dot{I}_L+\dot{I}_C$，$\dot{I}$ 滞后电压 $\dot{U}$ 为 φ_2 角，且 $\varphi_2<\varphi_1$，则功率因数 $\cos\varphi_2>\cos\varphi_1$，从而提高了电路的功率因数。

现要求把电感性负载的功率因数从 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$，试确定要并联多大的电容器。

并联电容器前 $P=UI_L\cos\varphi_1$；$I_L=\dfrac{P}{U\cos\varphi_1}$

并联电容器后 $P=UI\cos\varphi_2$；$I=\dfrac{P}{U\cos\varphi_2}$

由图 1－17（b）相量图可见

$$I_C=I_L\sin\varphi_1-I\sin\varphi_2=\frac{P}{U}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)$$

由式
$$I_C=\frac{U}{X_C}=U\omega C$$

代入上式
$$U\omega C=\frac{P}{U}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)$$

可得
$$C=\frac{P}{U^2\omega}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2) \tag{1-40}$$

应用式（1－40）可求出功率因数从 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$ 所需的并联电容。

例 1－9 有一电感性负载接在 220V 的工频交流电源上，吸收的有功功率 $P=10\text{kW}$，功率因数为 0.7。现要求把功率因数提高到 0.9，求：① 所需要并联电容器的电容量；② 比较并联电容前后的线路电流。

解：（1）感性负载的阻抗角 $\varphi_1=\cos^{-1}0.7=45.57°$

并联电容后电路的阻抗角 $\varphi_2=\cos^{-1}0.9=25.84°$

所需并联的电容量为

$$C=\frac{P}{U^2\omega}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=\frac{10\times10^3}{220^2\times2\times\pi\times50}(\tan45.57°-\tan25.84°)=352\mu\text{F}$$

（2）未并电容时线路中的电流等于负载电流，即

$$I=I_L=\frac{P}{U\cos\varphi_1}=\frac{10\,000}{220\times0.7}=64.94\text{A}$$

并联电容后，线路中的电流为 $I=\dfrac{P}{U\cos\varphi_2}=\dfrac{10\,000}{220\times0.9}=50.51\text{A}$

可见并联电容后线路中电流有效值减少了 $64.94-50.51=14.43\text{A}$。

第二节 三相交流电路分析与计算

一、对称三相交流电源

三相交流发电机有定子和转子组成，对于汽轮发电机来说转子是一对磁极，定子嵌有三相绕组，三相绕组 AX、BY 和 CZ 的匝数和尺寸完全相同，只是它们在空间的位置上顺时针彼此相差 120°。当转子磁极按顺时针方向匀速旋转时，在三相线圈中都会产生感应电动势，在线圈两端产生电压，在发电机的设计和制造时，使产生的电压按正弦规律变化。如果我们把三相绕组的始端规定为 A、B、C，末端规定为 X、Y、Z，且设电压参考方向为由始端到

电流对称时，线电流也是对称的。线电流 $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$ 在相位上分别滞后于相应相电流 $\dot{I}_{BA}$、$\dot{I}_{CB}$、$\dot{I}_{AC}$ 30°，大小上线电流的有效值是相电流的$\sqrt{3}$倍。即

$$I_L = \sqrt{3}\, I_P \tag{1-49}$$

上述有关电源的线电压与相电压、线电流与相电流的关系同样适用于对称三角形负载。

三、三相交流电路分析

（一）对称三相电路分析

对称三相电路就是由对称三相电源、对称三相负载和复阻抗相等的端线组成的电路。从电路结构上看，三相电路是一个多分支的复杂交流电路，可用求解复杂电路的方法进行分析计算。但对称三相电路具有一些特殊规律，因此可以找到比较简便的分析计算方法。下面介绍不同连接方式的三相电路的分析方法。

1. 对称三相四线制 Y－Y 三相电路

首先分析如图 1－24 所示的对称三相四线制 Y－Y 三相电路。设对称三相电源的电压分别为 $\dot{U}_A = U\angle 0°$，$\dot{U}_B = U\angle -120°$，$\dot{U}_C = U\angle 120°$，对称三相负载的复阻抗为 $Z_A = Z_B = Z_C = Z$，若端线的复阻抗为 Z_L，中线的复阻抗为 Z_N，应用节点电压法（弥尔曼定理）：

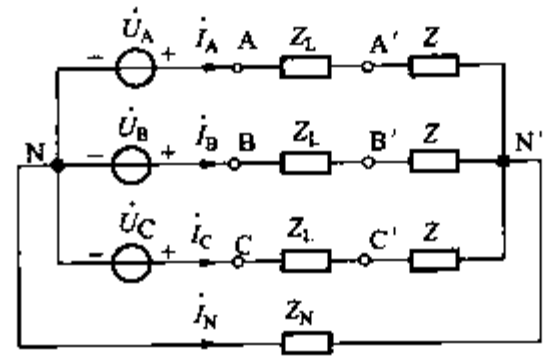


图 1－24　对称三相四线制 Y－Y 三相电路

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\frac{1}{Z_A+Z_L}\dot{U}_A + \frac{1}{Z_B+Z_L}\dot{U}_B + \frac{1}{Z_C+Z_L}\dot{U}_C}{\frac{1}{Z_A+Z_L}+\frac{1}{Z_B+Z_L}+\frac{1}{Z_C+Z_L}+\frac{1}{Z_N}} = \frac{\frac{1}{Z+Z_L}(\dot{U}_A+\dot{U}_B+\dot{U}_C)}{\frac{3}{Z+Z_L}+\frac{1}{Z_N}}$$

由于 $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$，可得 $\dot{U}_{N'N} = 0$。

由此可得出这样的结论：在电源和负载都是星形连接的对称三相正弦交流电路中，无论中线阻抗为何值，电源中性点 N 与负载中性点 N′之间的电压为零。也就是说，Y－Y 连接的对称三相正弦交流电路中电源中性点 N 与负载中性点 N′等电位。电路中等电位点可以用无阻抗的导线连接起来。因此，对于电源和负载都是星形连接的对称三相正弦交流电路，无论有无中线，不管中线阻抗为何值，在计算时可用无阻抗的导线将电源中性点与负载中性点连接起来。

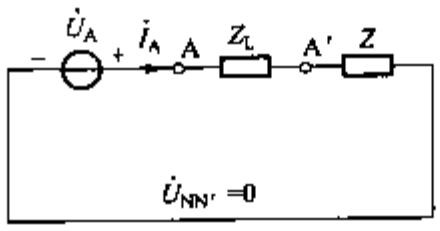


图 1－25　单相计算电路

这一结论表明，从电路计算的角度看，对称 Y－Y 三相电路中各相之间彼此无关，相互独立。各相电流仅由各相电源电压和各相阻抗决定，而与其他两相的阻抗、电源电压及中线阻抗无关。一相（如 A 相）电路中的电压、电流可用如图 1－25 所示单相电路来计算。

应用欧姆定律，可求得各相电流（线电流）：

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_L+Z} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_L+Z} = \alpha^2\dot{I}_A = I_A\angle -120° \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z_L+Z} = \alpha\dot{I}_A = I_A\angle 120° \end{aligned}\right\} \tag{1-50}$$

性点位移，负载中性点和电源中性点间的电压 $\dot{U}_{N'N}$ 称为中性点位移电压。

设 $\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$、$\dot{U}_C$ 对称，求得中性点位移电压 $\dot{U}_{N'N}$ 之后，应用基尔霍夫电压定律可求得三相负载上的相电压

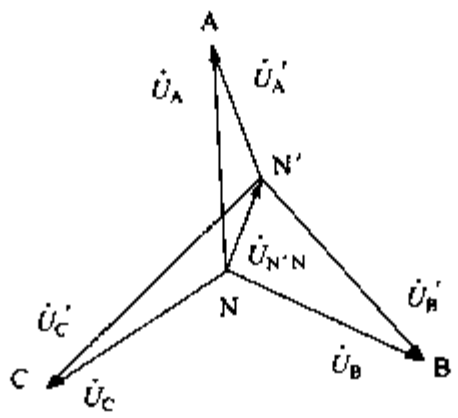


图 1－30　负载中性点位移

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_{N'N}\\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N}\\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N}\end{aligned}\right\} \tag{1-58}$$

根据上式可作出各相负载电压的相量图，如图 1－30 所示，可见这种情况下三相负载上的相电压是不对称的。

三相负载的电流分别为

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}'_A}{Z_A},\quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}'_B}{Z_B},\quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}'_C}{Z_C} \tag{1-59}$$

由于三相负载复阻抗不等及负载上三相电压不对称，所以三相电流也是不对称的。

在无中线负载不对称的 Y－Y 连接的三相电路中，由于中性点位移电压 $\dot{U}_{N'N}$ 的出现，造成负载上的相电压不对称，使得有的相电压高于电源相电压（见图 1－30 中 B、C 相），有的相电压低于电源相电压（见图 1－30 中 A 相）。电压过高，可能造成电气设备损坏；电压过低，用电设备不能正常工作。如果装设中线，且中线阻抗很小，就能使得中性点位移电压很小（$\dot{U}_{N'N} \approx 0$），从而避免上述现象的产生。可见：中线的主要作用就在于减小中性点位移电压，使星形连接的不对称负载的相电压对称。在实际电力系统中，为避免中线断开，中线应具有足够的机械强度且安装牢固，同时中线上不应装设熔断器和开关。

（三）三相交流电路功率

三相电路中三相负载吸收的总有功功率、总无功功率分别等于各相有功功率、无功功率之和，即

$$\left.\begin{aligned}P &= P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C\\ Q &= Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin\varphi_A + U_B I_B \sin\varphi_B + U_C I_C \sin\varphi_C\end{aligned}\right\} \tag{1-60}$$

式中：U_A、U_B、U_C 表示三相相电压的有效值；I_A、I_B、I_C 表示三相相电流的有效值；φ_A、φ_B、φ_C 分别表示各相的相电压与相电流之间的相位差。

三相正弦交流电路的视在功率的定义式为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{1-61}$$

应注意，一般情况下，三相正弦交流电路的视在功率不等于各相视在功率之和。

在对称三相交流电路中，三相电压和三相电流都是对称的，有

$$U_A = U_B = U_C = U_P,\quad I_A = I_B = I_C = I_P,\quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$$

所以各相电路的有功功率、无功功率及视在功率均分别相等，因而对称三相正弦交流电路的总功率

$$\left.\begin{aligned}P &= 3P_A = 3U_P I_P \cos\varphi\\ Q &= 3Q_A = 3U_P I_P \sin\varphi\\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_P I_P\end{aligned}\right\} \tag{1-62}$$

可见，对称三相电路的有功功率、无功功率及视在功率分别等于一相有功功率、无功功率及视在功率的三倍。

在电力系统中，由于三相电气设备铭牌标出的电压和电流通常是线电压和线电流的额定

容元件充电的物理过程。

从能量的观点来看，电容元件的充电过程就是其电场能量不断积累的过程。换路后初始瞬间，电容元件中的电场能量为零；充电过程中，电容元件不断地从电源吸取能量，并把它转变为电场能量，充电结束时，电容元件所储存的电场能量为$\frac{1}{2}CU_S^2$。充电过程中电源提供的能量，一部分转换成电场能量，储存于电容元件之中，另一部分被电阻吸收，转换为热能而损耗掉。

根据基尔霍夫电压定律：　$u_C + u_R = U_S$

电阻、电容元件的电压与电流的关系：　$u_R = Ri$，$i = C\frac{du_C}{dt}$

换路定律：　$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$

可以得到一个描述过渡过程中电压 u_C 变化规律的电路方程

$$\left.\begin{aligned} &RC\frac{du_C}{dt} + u_C = U_S \\ &u_C(0_+) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{1-80}$$

这是一个含有未知变量 u_C 的一阶导数$\frac{du_C}{dt}$的方程，称为一阶微分方程。过渡过程中，电路中电压和电流的变化规律是由初始条件和描述电路动态规律的微分方程共同决定的，因此，我们把初始条件与描述电路动态规律的微分方程写在一起。

由数学分析可知，该方程的解为

$$u_C = U_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \qquad (t \geqslant 0) \tag{1-81}$$

式中　$\tau = RC$——电路的时间常数，单位为秒（s）。

由 u_C 可求出电流

$$i = C\frac{du_C}{dt} = C\frac{d}{dt}(U_S - U_S e^{-\frac{t}{\tau}}) = \frac{U_S}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (t \geqslant 0) \tag{1-82}$$

应注意，以上表达式只适用于换路后的情况，即只适用于 $t \geqslant 0$ 的情况，对于换路前是不适用的。

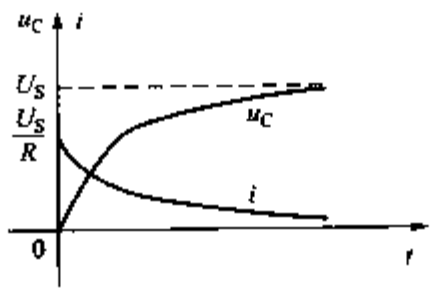


图 1－38　电压、电流随时间变化曲线

根据式（1－81）、式（1－82），可画出 u_C 和 i 随时间变化的曲线，如图 1－38 所示。

从 u_C 和 i 的表达式或它们的变化曲线可以看出，在充电过程中，电容元件的电压 u_C 从初始值 0 开始，按指数规律逐渐上升，最后趋于稳态值 U_S。电路中的电流 i 从初始值$\frac{U_S}{R}$开始，随着电压 u_C 的上升，按相同的指数规律逐渐减小，最后趋于零。

R 和 C 的乘积称为 RC 电路的时间常数 τ。当 R 的单位为欧姆（Ω），C 的单位为法拉（F）时，τ 的单位为秒（s）。时间常数 τ 的大小取决于电路的结构和元件的参数。对于 RC 串联电路，R、C 越大，τ 越大；反之，R、C 越小，τ 越小。对于 RC 电路的充电过程而言，τ 的大小标志着充电的快慢，τ 越小，充电越快；反之，τ 越大，充电越慢。

从理论上讲，换路后的电路一般需要经过无限长的时间（$t \to \infty$）才能达到稳定。但是，

由于指数函数 $Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ 开始衰减较快，往后逐渐减慢，实际上经过 $3\tau \sim 5\tau$ 的时间，就可认为电路达到了稳定状态。

（二）*RC* 串联电路的放电过程

RC 串联电路的放电过程，电路如图 1－39 所示，换路前开关 S 合在位置 1 上，电路已处于稳态。在 $t=0$ 时，将开关从位置 1 合至位置 2。

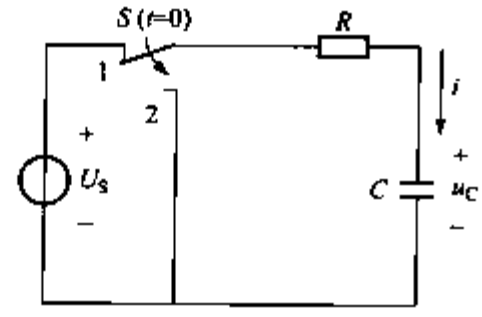


图 1－39 *RC* 串联电路

（1）电容元件放电的物理过程。

电容元件放电的物理过程如下：开关合在位置 1 时，电容元件已充电，其电压为 U_0（$U_0=U_S$）。开关合至位置 2 的最初瞬间，由于电容元件的电压不能跃变，电容元件的电压 u_C 仍能保持为 U_0。这时电容元件负极上的负电荷在电场力的作用下，脱离负极，经电阻 *R* 移至电容元件的正极，与正极上的正电荷中和。同时由于电荷的定向运动，电路中产生电流 *i*。随着时间的推移，电荷不停地运动，电容元件两极上的正负电荷不断地中和，两极上储存的电荷不断减少，电场逐渐减弱，电容元件上的电压逐渐下降，电路中的电流逐渐减小。直至电容元件两极上的电荷全部中和，电路中各量均为零时，放电过程告以结束，电路进入稳态。

电容元件在换路最初瞬间储存的能量为 $\frac{1}{2}CU_0^2$。换路后，电路中的电阻以 i^2R 这样的值不断吸收电场能量，并把它转换为热能，造成了电场能量的逐渐减小，最终导致电容元件中的储能完全消失。

（2）放电过程中电压、电流的变化规律。

放电过程中电容元件的电压、电流的变化规律同样可通过数学分析而获得。根据基尔霍夫电压定律、换路定律及元件的电压和电流的关系，可列出换路后的电路方程

$$\left.\begin{aligned} RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C&=0 \\ u_C(0_+)&=U_0 \end{aligned}\right\} \tag{1-83}$$

解方程，可得

$$u_C=U_0\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-84}$$

$$i=C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=-\frac{U_0}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-85}$$

式中：τ 为电路的时间常数，s。$\tau=RC$。

根据以上公式，可画出 u_C 和 *i* 随时间变化的曲线，如图 1－40 所示。

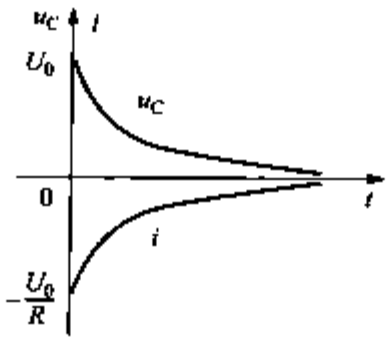


图 1－40 电压、电流变化曲线

从 u_C 和 *i* 的表达式或它们的变化曲线可以看出，在放电过程中，电容电压 u_C 从初始值 U_0 开始，按指数规律下降，最后趋于零。放电电流 *i* 从 $\frac{U_0}{R}$ 开始，按相同的指数规律最后也趋于零。

三、*RL* 串联电路的过渡过程

（一）*RL* 串联电路与直流电压源接通

RL 串联电路与直流电压源接通的电路如图 1－41 所示。开关 S 在 $t=0$ 时闭合。开关合

电路中的电流从初始值 I_0 开始逐渐减小，电感元件的电压的绝对值从初始值 RI_0 开始按照同样的规律逐渐下降，最后趋于零，过渡过程结束。

从能量观点看，RL 串联电路短接的过渡过程就是电感元件中磁场能量不断释放的过程，即电感元件的灭磁过程。换路前电感元件中建立的磁场，储存的磁场能量为$\frac{1}{2}LI_0^2$。换路后，电路失去了激励能源，仅靠电感元件的储能来维持电流。而电路中的电阻则以 i^2R 的速率不断地从电感元件中吸取能量，并将这些能量转变为热能，耗散于周围空间。最后电感元件中所储存的磁场能量全部被消耗掉。

四、一阶电路的三要素法

只含有一个独立储能元件的电路称为一阶电路。通过对一阶电路的分析和总结，可以得出一阶电路暂态过程中电压或电流的一般表达式，表达式形式如下：

$$f(t)=f_\infty(t)+[f(0_+)-f_\infty(0)]e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-92}$$

式中：$f(t)$ 为电路中的电压或电流；$f(0_+)$ 为电压或电流的初始值；$f_\infty(t)$ 为电压或电流的稳态分量；$f_\infty(0)$ 为电压或电流的稳态分量的初始值；τ 为换路后电路的时间常数。

由此可知，只要求出$f_\infty(t)$、$f(0_+)$ 和 τ 这三个特征量，就可以根据式（1－88）直接写出待求的电压或电流的表达式，而不必再建立电路方程并求解电路方程。这种方法称为三要素法。$f_\infty(t)$、$f(0_+)$ 和 τ 称为一阶电路的三要素。

三要素法的适用范围是：可用于计算一阶电路过渡过程中的任意电压和电流。对电路的限制条件是：

1）电路应是一阶电路；

2）换路后，电路应能够建立起稳定状态，且电压或电流的稳态分量可用稳态电路的分析方法求得。

对于直流电源或正弦交流电源作用下的一阶电路，一般都可以应用三要素法。应用三要素法求解一阶电路的关键是要求出三个要素。关于初始值$f(0_+)$ 的计算，我们已在前面讨论了。下面分别介绍时间常数 τ 和稳态分量$f_\infty(t)$ 的计算方法。

（一）时间常数 τ 的计算方法

（1）画出求 τ 的等效电路。

将换路后的电路中的电压源用短路替代，电流源用开路替代，电阻和储能元件仍保留在原来位置上。经过这样处理后所得到的电路为求 τ 的等效电路。

（2）计算求 τ 的等效电路中从储能元件两端看出去的二端网络的等效电阻 R。

例如，图 1－45（b）、（c）所示的求 τ 的等效电路中，从电容元件两端看出去的二端网络，其等效电阻为

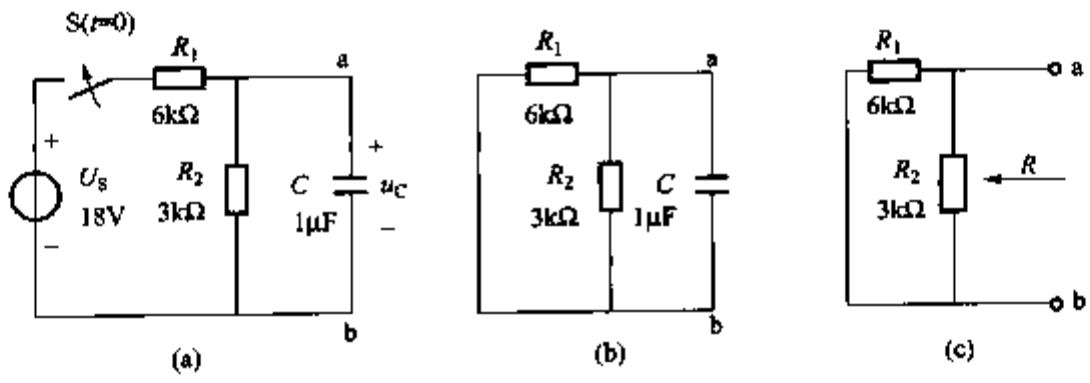


图 1－45　求 τ 的等效电路

在此空间存在磁场。磁场具有方向性。在磁场中某处放置一个小磁针，将受磁场力的作用并有一定的方向，规定磁针 N 极所指的方向为该处磁场方向。

（一）磁感应强度与磁通

1. 磁感应强度

表征磁场性质的基本物理量是磁感应强度 B。可用洛伦兹力来定义，磁场中某点的磁感应强度，其方向即为该点的磁场方向，其数值为单位正电荷在该点以单位速度运动时所受的最大磁场力（即速度与磁场方向垂直时所受的磁场力），即

$$B = \frac{F_{max}}{qv} \tag{1-94}$$

式中：F_{max}为点电荷 q 在该点运动时所受的最大磁场力；v 为其运动速度。在国际单位制中，B 的单位为特斯拉，简称特，用 T 表示。工程上，B 还常以高斯为单位，用 GS 表示，它与特斯拉（T）的关系为 $1GS = 10^{-4}T$。

磁场可用磁力线来形象描述。磁力线按下述规定画出：磁力线上每一点的切线方向即为该点的磁场方向；通过磁场中某点垂直于向量的单位面积上磁力线数等于该点向量 B 的数值，即磁力线的密度等于该点的磁感应强度值。实验表明，在磁场中任一点，向量都有确定的方向，因此，磁力线互不相交。且磁力线总是环绕着产生磁场的电流而闭合，其方向与电流方向符合右手螺旋关系。

在磁场中每一点上，若磁感应强度的方向相同、数值相等，则称为均匀磁场，否则，称为非均匀磁场。

2. 磁通

在电磁问题的分析中，要用到磁通的概念。在均匀磁场中，取一个与磁感应强度向量 B 垂直的平面 S，则它们的乘积

$$\Phi = BS \tag{1-95}$$

Φ 称为磁通。其单位为韦伯，用 Wb 表示。

在不均匀磁场中，为计算磁通，可在磁场中取一小面积元 ds，使 ds 与该点磁场方向垂直。因 ds 很小，可认为在面积元 ds 上磁感应强度 B 为常数，磁场是均匀的，穿过的磁通为

$$d\phi = Bds$$

若在磁场中取一曲面 S，以 Φ 表示穿过此曲面的磁通，则有穿过曲面 S 的磁通为

$$\Phi = \int_S d\phi = \int_S Bds \tag{1-96}$$

由上式看出，磁通是一个标量，它没有空间方向，但有正负。当 B 与 ds 的夹角小于 90°时，$B \cdot ds$ 为正；B 与 ds 的夹角大于 90°时，$B \cdot ds$ 为负。穿过某曲面 S 的磁通可以形象地用穿过该面积 S 的磁力线的根数来表示。

当磁感应强度和通过它的面积垂直，且它在此面积中均匀分布时，则有

$$B = \frac{\Phi}{S} \tag{1-97}$$

即磁感应强度值为穿过单位面积的磁通量，故又称为磁通密度（简称磁密）。

由于磁力线总是闭合的，因此对于磁场中任一封闭面而言，穿入的磁力线数必等于穿出的磁力线数。对封闭曲面来说，一般规定指向向外的正法线方向为正，因此，穿出封闭曲面的磁通为正，穿入封闭曲面的磁通为负，通过任一闭合曲面的总磁通量必然为零，称为磁通的连续性。即

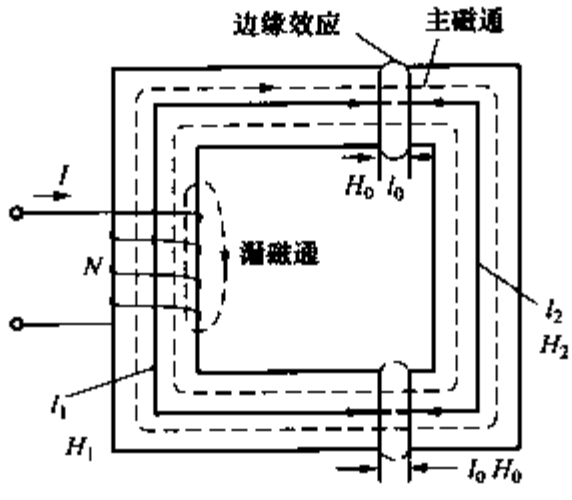


图 1－56 含气隙的磁路

定律。对图 1－55（b）中磁路的分支点（节点）取封闭曲面 S，根据磁通的连续性，忽略漏磁通后，进入封闭曲面 S 的磁通与穿出该曲面的磁通相等。因此，磁路分支点（节点）所连各支路磁通的代数和为零，即

$$\sum \Phi = 0 \tag{1-100}$$

这就是磁路基尔霍夫第一定律的表达式。在图 1－55（b）中，若把封闭曲面 S 看作节点，进入节点的磁通取正号，离开节点的磁通取负号，则

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \quad 或 \quad \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 \tag{1-101}$$

即进入节点的磁通等于离开节点的磁通。根据磁路的基尔霍夫第一定律，无分支磁路任一截面的磁通是相同的。

（三）磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路计算中，为了找出磁通和励磁电流之间的关系，需要应用安培环路定律（又称全电流定律）。安培环路定律的内容是：在磁场中，磁场强度沿任意闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径所限定面积的电流的代数和。用公式表示为

$$\oint_l H\mathrm{d}l = \sum I \tag{1-102}$$

在具体应用此定律时，闭合路径所限定的面积的方向可由路径方向的右手定则确定。公式等号右边各项的正负号为：当电流的方向与该面积上磁通的方向一致者为正号，不一致者为负号。由图 1－56 可得 $\oint_l H\mathrm{d}l = H_1 l_1 + H_0 l_0 + H_2 l_2 + H_0 l_0 = \sum (Hl)$

$$\sum i = NI$$

代入式（1－102）得到

$$\sum (Hl) = NI \tag{1-103}$$

上式是磁路的基尔霍夫第二定律。式中 l 为磁路的长度，N 为线圈的匝数。此式中某段磁路的长度与其磁场强度的乘积 Hl 称为该段磁路的磁压或磁位降，用 U_M 表示。沿磁场方向的磁压为正。乘积 NI 称为磁动势或磁势，通常用 F 表示：$F = NI$。式（1－103）表明：闭合磁路中各段磁压的代数和等于各磁势的代数和。磁动势的方向由电流确定，与电流符合右手螺旋关系。磁压、磁动势的方向与闭合路径绕行方向一致者取正号，反之取负号。

（四）磁路的欧姆定律

磁路的第三个定律是磁路的欧姆定律。此定律可导出如下

$$\left.\begin{aligned} \Phi = BS = \mu HS = \frac{Hl\mu S}{l} = \frac{Hl}{\dfrac{l}{\mu S}} = \frac{U_M}{R_M} \\ \Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{IN}{R_M} \end{aligned}\right\} \tag{1-104}$$

式（1－104）叫做磁路的欧姆定律，它具有与电路的欧姆定律相似的形式。式中 $R_M = \dfrac{l}{\mu S}$ 称为磁阻，其单位为 $1/H$。磁阻的大小与磁路的长度成正比，与磁路的截面和磁导率成反比。

铁芯尺寸和重量加大，成本增加。电力工程上，在额定情况下运行的电气设备，通常使铁芯在接近饱和的区域 b 点（饱和点）工作见图 1－50。

（三）正弦电流作用下的磁通波形

现在讨论正弦电流通过铁芯线圈时的情况。若正弦电流 $i(t)=I_m\sin\omega t$ 通过铁芯线圈，同样应用 $\Phi-i$ 曲线，得到磁通 $\Phi(t)$ 的波形，如图 1－60 所示。

由图可见，在正弦电流 i 作用下由于磁饱和的影响，铁芯线圈的磁通 $\Phi(t)$ 为平顶波，$\Phi(t)$ 中含有明显的三次谐波分量。三次谐波磁通将在铁芯线圈中感应三次谐波电动势。

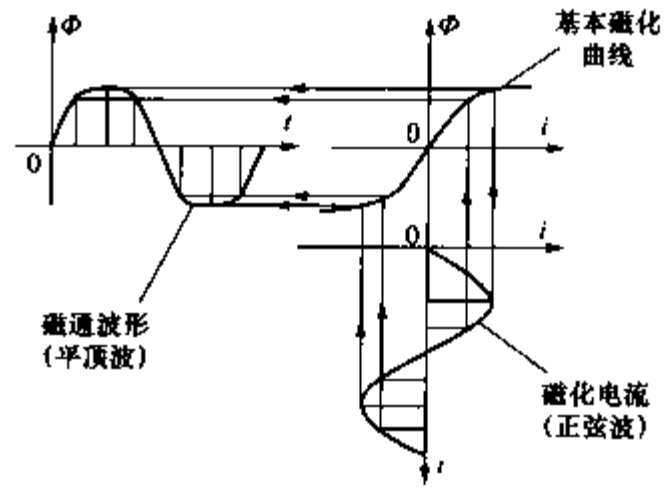


图 1－60 磁路饱和时正弦电流与平顶磁通的关系

（四）交流铁芯线圈的损耗

铁芯线圈的磁滞损耗与涡流损耗的总和称为铁芯损耗，简称铁损。

1. 磁滞损耗

产生磁滞损耗的原因是由于磁畴在交流磁场的作用下反复转向，引起铁磁物质内部的摩擦，这种摩擦使铁芯发热产生损耗。磁滞损耗正比于磁滞回线的面积，通常交流铁芯都采用软磁材料，所以磁滞损耗较小。工程上常用下列经验公式计算磁滞损耗 P_h：

$$P_h=k_h f B_m^n V \quad (W) \tag{1-107}$$

式中 f——磁场每秒交变的次数（即频率），Hz；

B_m——磁感应强度的最大值，T；

n——指数，由 B_m 的范围决定，当 $0.1T<B_m<1.0T$ 时，$n=1\sim6$；当 $0<B_m<0.1T$ 和 $1T<B_m<1.6T$ 时，$n=2$；

V——铁磁物质的体积，单位为 m^3；

k_h——与铁磁物质性质结构有关的系数，由实验确定。

电力工程中，为降低磁滞损耗，常选用磁滞回线较狭长的软磁材料制造铁芯，如硅钢片就是制造变压器、电机铁芯的常用材料，其磁滞损耗较小。

2. 涡流损耗

当铁芯中磁通变化时，不但在线圈中会感应电动势，在铁芯中同样会感应电动势，而块状的铁芯可看作由许多回路构成，因而感应电动势会在铁芯中产生旋涡状的感应电流，称为涡流，涡流在垂直于磁力线的平面中流动，通过铁芯自身电阻时会消耗能量，使铁芯发热。这种能量损耗称为涡流损耗。工程上常用下列经验公式计算涡流损耗 P_w：

$$P_w=k_w f^2 B_m^2 V \quad (W) \tag{1-108}$$

式中：k_w 是与铁芯材料的电阻率、厚度及磁通波形有关的系数。其余各量与式（1－107）的意义和单位相同。

在电机、变压器等电气设备中，涡流损耗使铁芯发热，降低设备的出力。常用两种方法来减小涡流损耗。一种是选用电阻率大的铁磁材料，如无线电设备中就选择电阻很大的铁氧体，而电机、变压器则选用导磁性好、电阻率较大的硅钢；另一种方法是设法提高涡流路径上的电阻值，用硅钢片叠成铁芯，片间涂以绝缘漆，使涡流不能沿大块铁芯截面流动，而只沿薄片的很小的截面流动，因而使涡流的路径大为加长。这两种方法都是为了增大涡流路径

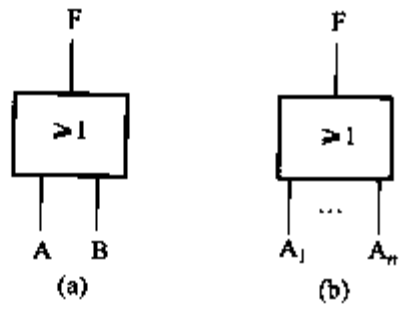


图 1－63 或逻辑符号

（a）两变量或逻辑符号；（b）多变量或逻辑符号

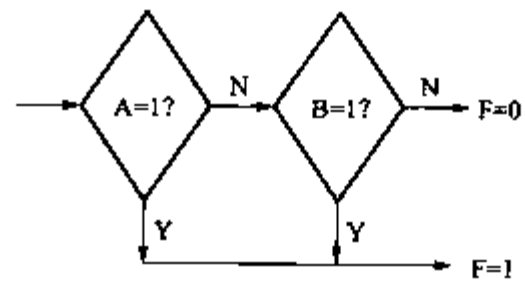


图 1－64 或逻辑软件流程图

（三）非逻辑

非逻辑符号如图 1－65 所示。一个小圆圈相当一个反相器。该图表示 F 的输出与 A 的输入状况相反。即 A 有输入（A＝1）时，F 没有输出（F＝0）；A 没有输入时（A＝0），F 才有输出（F＝1）。非的逻辑表达式写为：$F=\overline{A}$。在微机保护中非逻辑的软件流程框图如图 1－66 所示。

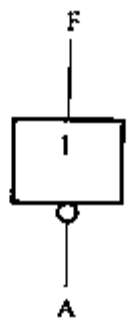


图 1－65 非逻辑符号

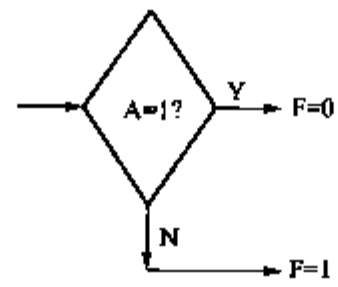


图 1－66 非逻辑软件流程图

（四）禁止逻辑

禁止逻辑符号如图 1－67 所示，B 的输入经过一个反相器加在与逻辑上。该图表示只要有 B 的输入（B＝1），肯定 F 没有输出（F＝0），只有 B 没有输入（B＝0）而且 A 有输入（A＝1）时，F 才有输出（F＝1）。在继电保护中 B 的输入表示是一个闭锁条件，当 B 有输入时把与逻辑闭锁，F 没有输出（F＝0）。禁止逻辑的表达式写为：$F=A*\overline{B}$。在微机保护中禁止逻辑的软件流程框图如图 1－68 所示。

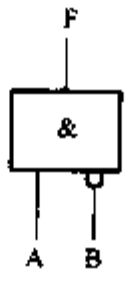


图 1－67 禁止逻辑符号

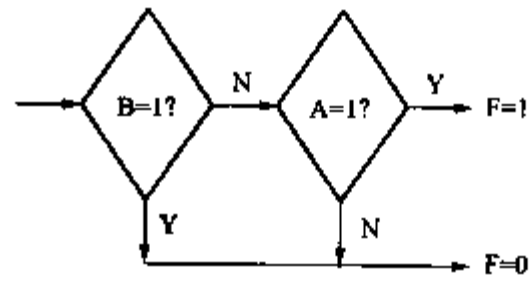


图 1－68 禁止逻辑软件流程图

（五）延时逻辑

延时逻辑的符号如图 1－69 所示。该图中第一个时间 t_1 是延时动作的时间，它表示当 A 有输入（A＝1）后经过 t_1 延时后 F 才有输出（F＝1）。该图中第二个时间 t_2 是延时返回的时间，它表示当 A 的输入返回（A＝0）以后，经过 t_2 的延时后 F 才返回（F＝0）。工作情况的示意图如图 1－70 所示。t_1 是延时动作的时间，t_2 是延时返回的时间。在微机保护中延

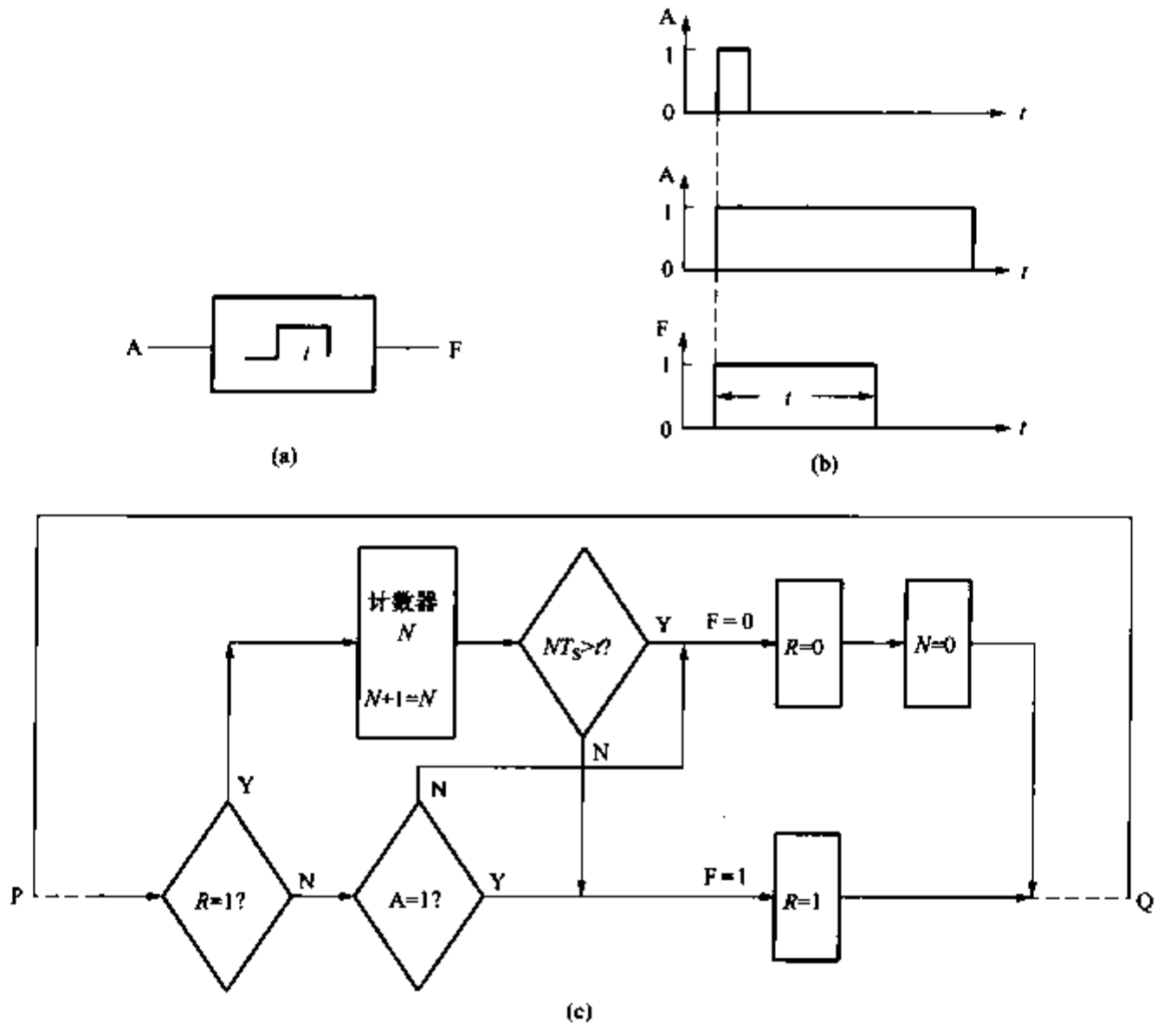


图 1－72 脉冲展宽逻辑

（a）脉冲展宽逻辑符号；（b）脉冲展宽逻辑示意图；（c）脉冲展宽逻辑软件流程图

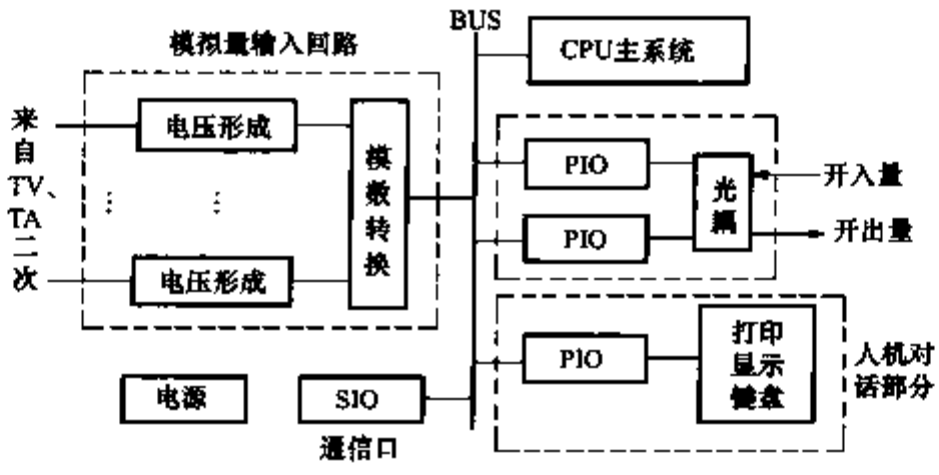


图 1－73 微机保护硬件系统构成示意图

数据采集系统的主要功能是采集由被保护设备的电流、电压互感器输入的模拟信号，并将此信号经过适当的预处理，然后转换为所需的数字量。数据处理系统包括微处理器 CPU（或 DSP），只读存储器（EPROM）、随机存取存储器（RAM）及定时器（TIMER）等。CPU 执行存放在 EPROM 中的程序，对由数据采集系统输入至 RAM 区的原始数据进行分析处理，以完成各种继电保护功能。开关量输入/输出系统由并行口、光电耦合电路及有接点的中间继电器等组成，以完成各种保护的出口跳闸、信号报警及外部接点输入等工作。人机接口部分主要包括打印、显示、键盘、各种面板开关等，其主要功能用于人机对话，如调试、定值调整、人对机器工作状态的干预等。人机接口应定时或在保护动作后打印或显示运

（3）采样保持电路。

采样保持电路的原理如图1－78所示，它由一个电子模拟开关AS、保持电容C_H及两个阻抗变换器组成。阻抗变换器Ⅰ和阻抗变换器Ⅱ的输入阻抗为无限大，输出阻抗为零。开关AS受采样脉冲控制，在脉冲到来时（脉冲控制端为高电平）AS闭合，此时电路处于采样状态，由于充电路径上电阻为零，输入电压u_i对电容C_H快速充电，使C_H上的电压马上等于u_i在采样时刻的电压值。在AS断开时（脉冲控制端为低电平），由于放电路径上的电阻为无穷大，电容C_H上保持住原采样电压，电路处在保持状态。采样脉冲宽度T_C为0，则其为一理想采样保持器。但这种理想状态是不可能实现的，因为，在采样状态（S态）时，C_H上的电压不可能立即跟踪输入电压，而有一个过渡过程；在保持状态（H态），C_H上的电压也不可能毫无衰减地保持住AS断开前的电压，有衰减量ΔU。实际的跟踪采样和保持过程见图1－79。我们把跟踪输入电压的时间成为截获时间。显然，我们希望在采样状态下，C_H上的电压跟踪输入电压的过渡过程越短越好，即C_H希望阻抗变换器Ⅰ的输出阻抗越小越好，使充电的时间尽可能短。同时我们还可以看出，采样脉冲宽度T_C必须满足截获时间，且尽可能窄，这样才能准确的反映某一时刻u_i的值。在保持状态下，希望C_H上的电压保持的时间尽可能长。为了提高保持能力，电路中的阻抗变换器Ⅱ的输入阻抗应越大越好，使C_H放电时间尽可能慢。而阻抗变换器Ⅱ的输出阻抗应很低，以增加带负载的能力。

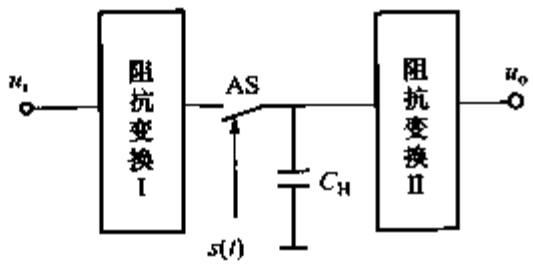


图1－78 采样保持电路原理图

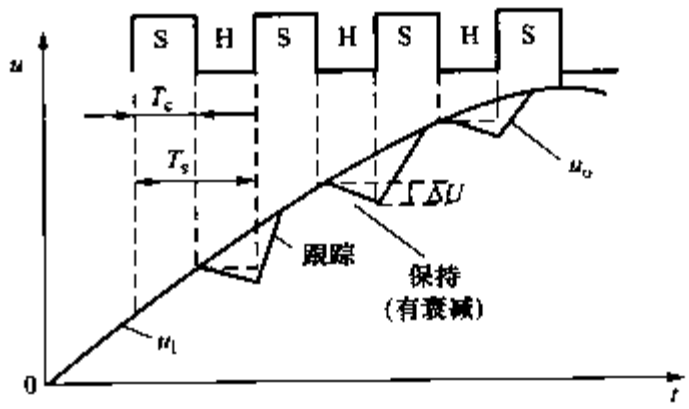


图1－79 实际的采样保持过程

3. 采样频率的选择和ALF的应用

微机保护所反映的电力系统参数是经过采样离散化之后的信号。那么，连续时间信号经采样离散化成为离散时间信号后是否会失真，也就是说这离散信号能否真实反映或代表被采样的连续信号，若要求不丢失信息，应满足什么条件？我们先观察图1－80所示的波形。设被采样信号$x(t)$的频率为f_0，其波形如图1－80（a）所示。对其进行采样，图1－80（b）是对$x(t)$每周采一点，即$f=f_0$，采样后所看到的除原信号外还增加了原信号中没有的一个直流信号（见虚线），出现频率混叠现象；在图1－80（c）中，当f_s略大于f_0时（这里$f=1.5f_0$），采样后所看到的除原信号外还增加了原信号中没有的一个低频信号（见虚线），也出现频率混叠现象；又由图1－80（d）可见，

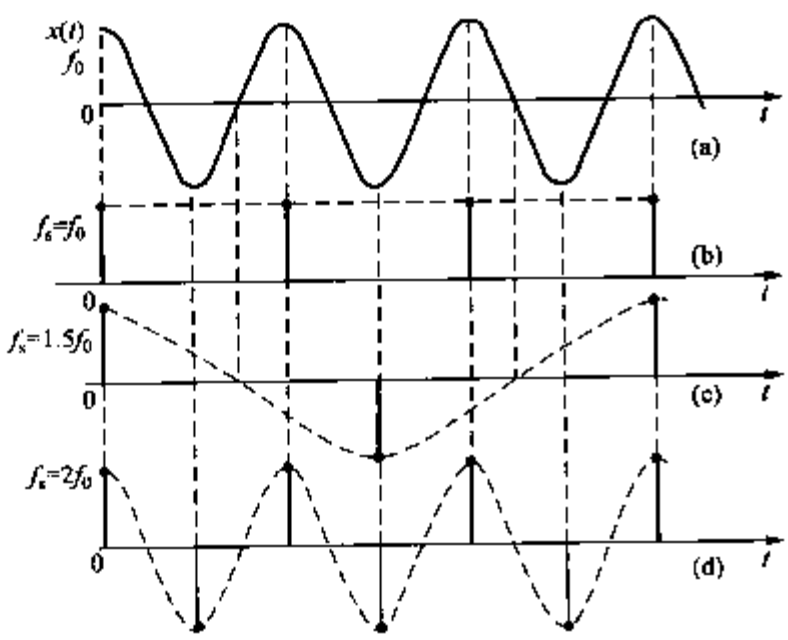


图1－80 频率混叠示意图

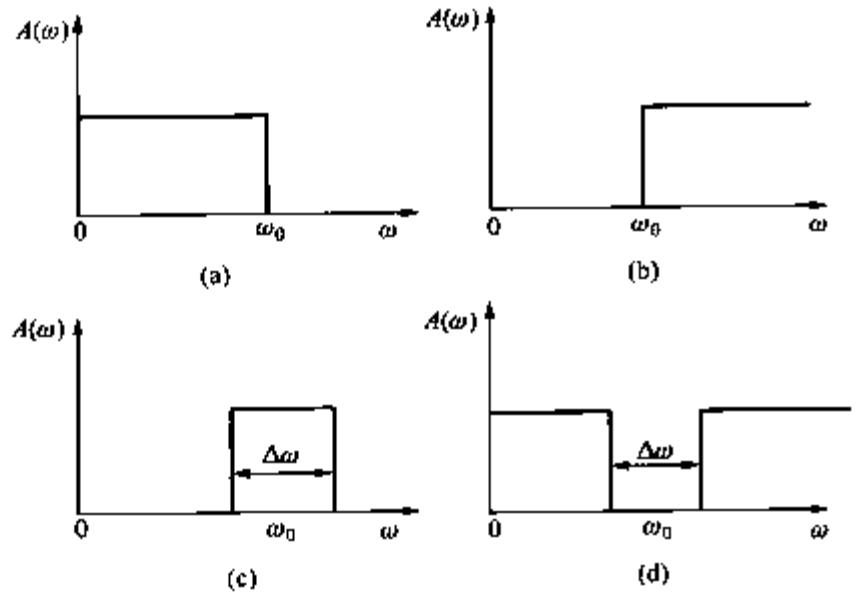


图 1－96 四种理想滤波器的幅频特性

(a) 低通；(b) 高通；(c) 带通；(d) 带阻

滤波器。

1. 差分滤波器（减法滤波器）

设 T_S 为采样周期，$x(nT_S)$ 为 $t=nT_S$ 时的输入数据（采样取得），$x(nT_S-KT_S)$ 为前 K 个 T_S 时刻［即 $t=(nT_S-KT_S$ 时）］的输入数据，$y(nT_S)$ 为 $t=nT_S$ 时的滤波器输出，则差分滤波器的差分方程为

$$y(nT_S)=x(nT_S)-x(nT_S-KT_S) \tag{1-114}$$

由于保护中采样间隔是均匀的（为 T_S），所以可以将 $x(nT_S)$、$y(nT_S)$ 直接写成 $x(n)$、$y(n)$，式（1－114）写成

$$y(n)=x(n)-x(n-K) \tag{1-115}$$

式（1－114）或式（1－115）就是差分滤波器的数学模式，它是一个 K 阶差分方程，其数据窗长度为 $K+1$ 或 $(K+1)T_S$。它表明了当前时刻的输出等于当前时刻的输入与 K 点以前的输入相减。其输出与该滤波器以前历史上的输出无关，所以这种滤波器是非递归型数字滤波器。差分滤波器的结构如图 1－97 所示，输入 $x(n)$ 经延时单位得到 $x(n-K)$，然后与输入 $x(n)$ 相减得到输出 $y(n)$。

那么上述滤波器是如何起到滤波作用的呢？我们可以用图 1－98 来说明滤波的原理。设输入信号中含有基波，其频率为 f_1，也含有 m 次谐波，其频率为 $f_S=mf_1$，如图 1－98 波形所示（图中 $m=3$ 为三次谐波）。输入信号为 $x(t)=A_1\sin2\pi f_1+A_m\sin2\pi mf_1t$。

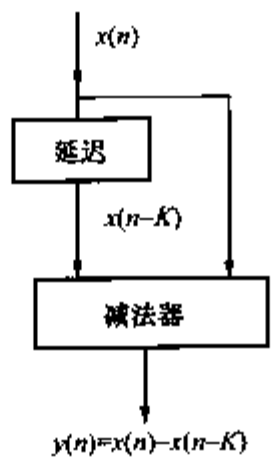


图 1－97 差分滤波器结构

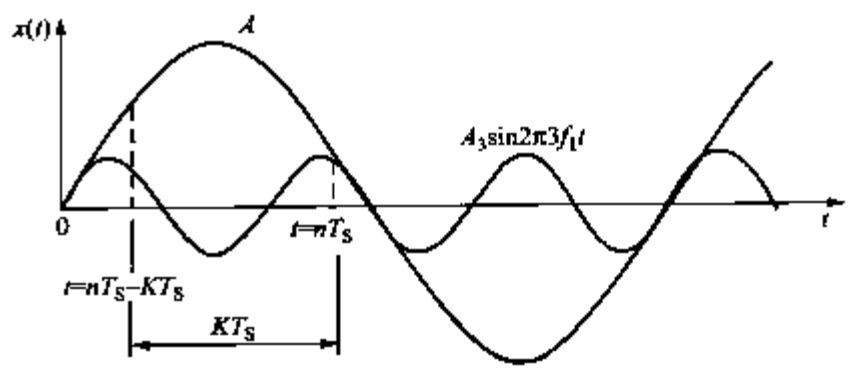


图 1－98 差分滤波器滤波原理说明

当 KT_S 刚好等于谐波的周期 $T_m=\dfrac{1}{mf_1}$，或者是 $\dfrac{1}{mf_1}$ 的整倍数（如 p 倍，$p=0,1,2,\cdots$）时，则在 $t=nT_S$ 及 $t=nT_S-KT_S$ 两点的采样值中所含该次谐波成分相等，故两点采样值相减后，恰好将该次谐波滤去，剩下基波分量。此时有 $KT_S=\dfrac{p}{mf_1}$。故滤去的谐波次数为

$$m=\frac{p}{KT_Sf_1}=\frac{N}{K}p \qquad (p=0,1,2,\cdots) \tag{1-116}$$

式中：N 为基波每周采样的次数。一般 N 是确定的想要滤除 m 次谐波，可求出 K 值。由此可见，当 f_1 和 T_S 已确定时，能滤掉的谐波最低次数是在 $p=0$ 时计算的 m 值，除此之外，

量的叠加

$$x(t)=x_0+x_1(t)+x_2(t)+\cdots+x_m(t)+\cdots \tag{1-122}$$

其中 $x_m(t)$ 为 m 次谐波，m 取自然数。对于 m 次谐波又可表示为

$$\begin{aligned}x_m(t)&=\sqrt{2}X_m\sin(\omega_m t+a_m)\\&=\sqrt{2}X_m(\sin\omega_m t\cos a_m+\sin a_m\cos\omega_m t)\\&=(\sqrt{2}X_m\cos a_m)\sin\omega_m t+(\sqrt{2}X_m\sin a_m)\cos\omega_m t\\&=(\sqrt{2}X_m\cos a_m)\sin m\omega t+(\sqrt{2}X_m\sin a_m)\cos m\omega t\\&=X_{ms}\sin m\omega t+X_{mc}\cos m\omega t\end{aligned} \tag{1-123}$$

式中：X_m 为 m 次谐波分量有效值；a_m 为 m 次谐波分量初相角；ω_m 为 m 次谐波分量角频率，$\omega_m=m\omega$（ω 为基波角频率）。

$$X_{ms}=\sqrt{2}X_m\cos a_m \tag{1-124}$$

$$X_{mc}=\sqrt{2}X_m\sin a_m \tag{1-125}$$

这表明一个周期函数 $x(t)$ 的各次谐波可以看成振幅分别为 X_{ms} 和 X_{mc} 的正弦项和余弦项之和。我们感兴趣的是 m 次谐波的正弦、余弦分量的系数 X_{ms} 和 X_{mc}，因为只要有了 X_{ms} 和 X_{mc} 后，就可求 m 次谐波的幅值 X_m 和相位 a_m

$$2X_m^2=X_{ms}^2+X_{mc}^2 \tag{1-126}$$

$$\tan a_m=\frac{X_{mc}}{X_{ms}} \tag{1-127}$$

下面的问题就是如何求取 X_{ms} 和 X_{mc}。求 X_{ms} 和 X_{mc} 的方法，根据数据窗的长度，可分为全周傅里叶算法和半周傅里叶算法。

1. 全周傅里叶算法

根据傅氏级数原理，当已知周期函数 $x(t)$ 时，可以求其 m 次谐波分量的正弦和余弦系数

$$X_{ms}=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin m\omega t\mathrm{d}t$$

$$X_{mc}=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos m\omega t\mathrm{d}t$$

式中：T 为 $x(t)$ 的周期，继电保护中感兴趣的是基波分量（$m=1$），因此基波分量的正弦和余弦分量的系数为

$$X_{1s}=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin\omega t\mathrm{d}t \tag{1-128}$$

$$X_{1c}=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos\omega t\mathrm{d}t \tag{1-129}$$

求上面的积分可以采用梯形和矩形法，设每周采样 N 点，则一周内各采样点分别为 n、$n-1$、$n-2$、…、$n-N+1$、$n-N$，对应的采样值就是在这些点上的 $x(t)$ 函数值 $x(n)$、$x(n-1)$、…、$x(n-N)$，将上面积分式中的 $\sin\omega t$ 及 $\cos\omega t$ 也进行离散化，于是有矩形法：

$$X_{1s}=\frac{2}{T}T_S[x(n)\sin n\omega T_S+x(n-1)\sin(n-1)\omega T_S$$

连续频谱，因此傅氏算法在衰减的非周期分量的影响下，计算误差较大。

从精度来看，由于半周傅氏算法的数据窗只有半周，其精度要比全周富氏算法差。当故障发生半周后，半周算法即可计算出真值，但精度差；全周算法在故障发生一周后才能计算出真值，精度较半周好。有的保护装置中采用变动数据窗的方法来协调响应速度和精度的关系。其做法是在启动元件启动之后，先调用半周傅氏算法程序，同时将保护范围减小10%。当故障达到一周时，调用全周傅氏算法程序，这时保护范围复原。这样，当故障在保护范围的0～90%以内时，用半周算法计算很快就趋于真值，精度虽然不高，但足以正确判断是区内故障；当故障在保护范围的90%以外时，仍以全周傅氏算法的计算结果为准，保证精度。

（四）积分算法

半周绝对值积分算法的原理是依据一个正弦量在任意半个周期内绝对值积分为一常数S，且积分值S与积分起始点即与初相角α无关，因为图1－103中两部分的阴影面积显然是相等的。

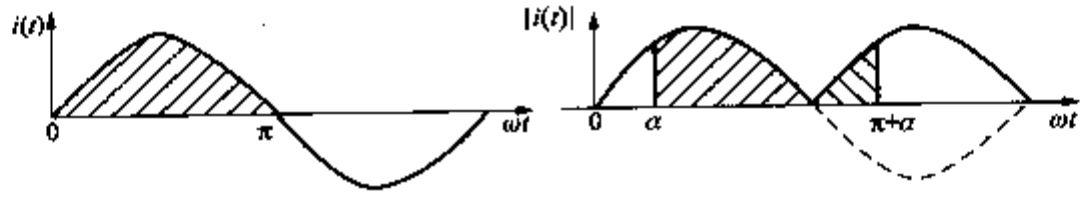


图1－103　半周积分算法原理示意图

半周绝对值积分的面积S为

$$S=\int_0^{T/2}|\sqrt{2}I\sin(\omega t+\alpha)|\,\mathrm{d}t=\int_0^{T/2}|\sqrt{2}I\sin\omega t|\,\mathrm{d}t=\frac{2\sqrt{2}}{\omega}I \tag{1-140}$$

由上式可知，只要知道了正弦波半周的面积S，则正弦波的幅值或有效值，可以用下面的公式计算

$$I=\frac{\omega}{2\sqrt{2}}S \tag{1-141}$$

下面的问题就是如何求取这个积分面积S。计算机求积分不是直接进行的，而是用求和来代替，故式（1－140）的积分可以用梯形法或矩形法近似求出。当用梯形法时，如图1－104所示。

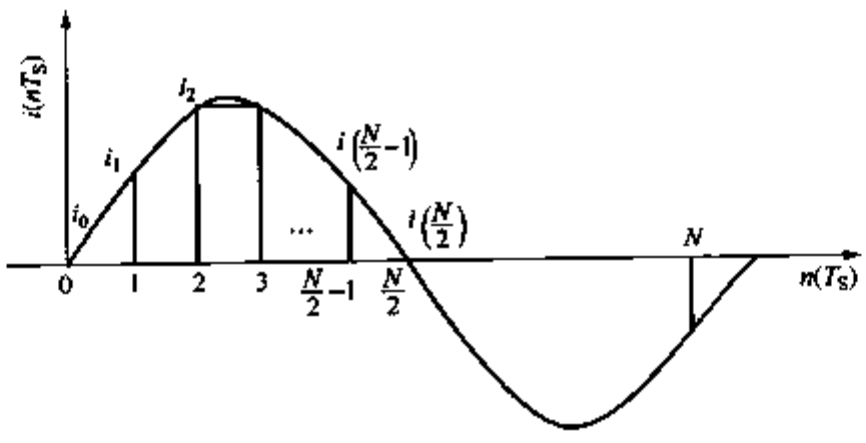


图1－104　用梯形法近似计算面积

设若干个小梯面积之和为S'，则有

$$S' = \left[\frac{|i_0| + |i_1|}{2} + \frac{|i_1| + |i_2|}{2} + \cdots + \frac{\left|i\left(\frac{N}{2}-1\right)\right| + \left|i\left(\frac{N}{2}\right)\right|}{2}\right]T_S \quad (1-142)$$

$$= \left[\frac{1}{2}|i_0| + |i_1| + \cdots + \left|i\left(\frac{N}{2}-1\right)\right| + \frac{1}{2}\left|i\left(\frac{N}{2}\right)\right|\right]T_S$$

式中：i_0，i_1，$\cdots i\left(\frac{N}{2}\right)$为 $n=0$，1，$\cdots\frac{N}{2}$时的采样值；N 为每周采样点数；T_S 为采样周期。

用求矩形面积和方法：

$$S' = T_S\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1}|i(n-k)| \quad (1-143)$$

显然用绝对值求和来代替绝对值积分（即用 S'代替 S）必然会带来误差。但只要采样频率足够高，T_S 足够小，误差就可以做到足够小。矩形法比梯形法公式较简洁，便于编程，但在相同的 T_S 下，精度较梯形法差。必须说明的是，第一个采样数据对应的正弦量的相角 α 不同，误差也不同，也就是说积分的起始点对误差有影响。

半周积分法的特点：

1）数据窗长度为半周加一个采样周期，对 50Hz 的工频正弦量而言，延时为 10ms + T_S；但是当作为保护算法使用时，不一定在短路后 10ms + T_S 时间后才开始计算。例如以电流速断保护为例，在短路以后就开始求半周面积。一开始用的是部分短路前的数据，随着时间的延续电流半周的面积越来越大。求出来的电流值也越来越大。只要超过定值就可跳闸，加快了保护动作的时间。所以用半周积分算法，保护动作时间较快。

2）由于进行的是积分运算，故具有滤波功能，对高频分量有抑制作用，但不能抑制直流分量。

3）本算法的精度与采样频率有关，采样频率越高，其精度越高，误差越小，误差还与初相角 α 有关。

4）由于只有加法运算，计算工作量小。

第二章

电力系统运行及故障分析

第一节　电力系统正常运行时的电压、电流及功率传输

图2－1示出了MN线路的等值系统图，线路正序阻抗为Z_{MN1}，M、N侧等值正序阻抗为Z_{M1}、Z_{N1}；M、N侧等值电动势为$\dot{E}_M$、$\dot{E}_N$；M、N母线电压为$\dot{U}_M$、$\dot{U}_N$；从M侧流向N侧的线路电流为$\dot{I}_{loa}$。

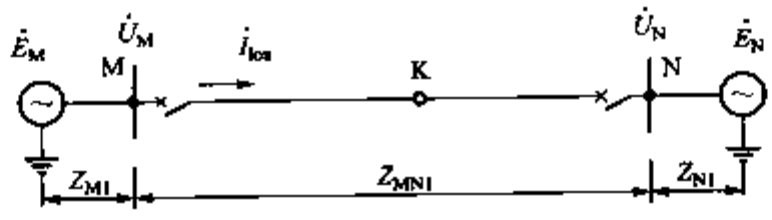


图2－1　MN线路等值系统图

一、正常运行时的电流、K点电压

分析M侧流向N侧的电流、K点电压。M侧流向N侧的线路三相电流为

$$\dot{I}_{loa\cdot A}=\frac{\dot{E}_{MA}-\dot{E}_{NA}}{Z_{M1}+Z_{MN1}+Z_{N1}}=\frac{\dot{E}_{MA}-\dot{E}_{NA}}{Z_{11}} \tag{2-1a}$$

$$\dot{I}_{loa\cdot B}=\frac{\dot{E}_{MB}-\dot{E}_{NB}}{Z_{11}}=a^2\dot{I}_{loa\cdot A} \tag{2-1b}$$

$$\dot{I}_{loa\cdot C}=\frac{\dot{E}_{MC}-\dot{E}_{NC}}{Z_{11}}=a\dot{I}_{loa\cdot A} \tag{2-1c}$$

式中：Z_{11}为系统总的综合正序阻抗，$Z_{11}=Z_{M1}+Z_{MN1}+Z_{N1}$；$a$、$a^2$为运算子，$a=e^{j120°}$、$a^2=e^{j240°}$。

如果$|\dot{E}_M|=|\dot{E}_N|=|\dot{E}_\varphi|$、$\dot{E}_M$超前$\dot{E}_N$的相角为$\delta$，计及$|\dot{E}_M-\dot{E}_N|=2|\dot{E}_\varphi|\sin\frac{\delta}{2}$，则从式（2－1）可知

$$|\dot{I}_{loa}|=\frac{2|\dot{E}_\varphi|}{Z_{11}}\sin\frac{\delta}{2} \tag{2-2}$$

可以看出，当两侧电动势同相时，有$I_{loa}=0$，即处于空载状态；当两侧电动势夹角δ逐渐增大时，相应的I_{loa}也逐渐增大。正常运行时δ角不会超过60°。若系统发生振荡，即δ在0°～360°作周期变化，则当$\delta=180°$时I_{loa}达最大值，也就是最大振荡电流$\left(\frac{2E_\varphi}{Z_{11}}\right)$；$\delta$过了180°后，随着$\delta$向360°趋近，$I_{loa}$逐渐减小。

图2－1中K点三相电压可表示为

$$\dot{U}_{KA[0]}=\dot{E}_{MA}-\dot{I}_{loa\cdot A}(Z_{M1}+Z_{MK1})$$

需要指出，分裂绕组变压器的分裂系数 K_f 定义为分裂阻抗与穿越阻抗之比，表示为

$$K_f = \frac{U_f\%}{U_c\%} \tag{2-50}$$

通常 K_f 为 4 左右。

$U_{k1}\%$、$U_{k2}\%$、$U_{k3}\%$ 求得后，按式（2－43）可求得分裂绕组变压器各绕组等值阻抗标幺值。

通过上述分析可得到：变压器的正序等值电路与变压器接线、铁芯结构没有关系。

（二）负序等值电路

变压器的负序等值电路完全与正序等值电路相同。

（三）零序等值电路

变压器的零序等值电路与变压器绕组接线方式、中性点接地与否及铁芯结构有关。

1）与绕组接线方式、中性点接地与否有关指的是：三角形绕组接线、中性点不接地

时，$Z_{\mu0}$ 较小，不能视为无穷大。　可认为 $Z_{\mu0}\to\infty$；当三相变压器为三柱式内铁型结构

一般情况下零序电压为 2% ~ 5% 额定相　同一变压器的 $Z_{\mu0}$ 值与所加零序电压大小有关

加压侧）时，$Z_{\mu0}$ 有最大值；当零序电压达到 20% ~ 30% 额定相电压（加压侧）时，　电压（加

饱和，有稳定的数值。　$Z_{\mu0}$ 趋于

双绕组变压器的零序参数和等值电路　1. 对

YN，d 接线组别变压器。　（1）

图 2－9（a）所示，当零序电压 $\dot{U}_0$ 加于 YN 侧（1 侧）时，零序电流 $\dot{I}_{01}$ 经 1 侧绕组　如图

入地形成回路。在 2 侧，在联结成三角形的三个绕组中形成零序电流 $\dot{I}_{02}$，如图中箭　中性点入

流向。　头所示流

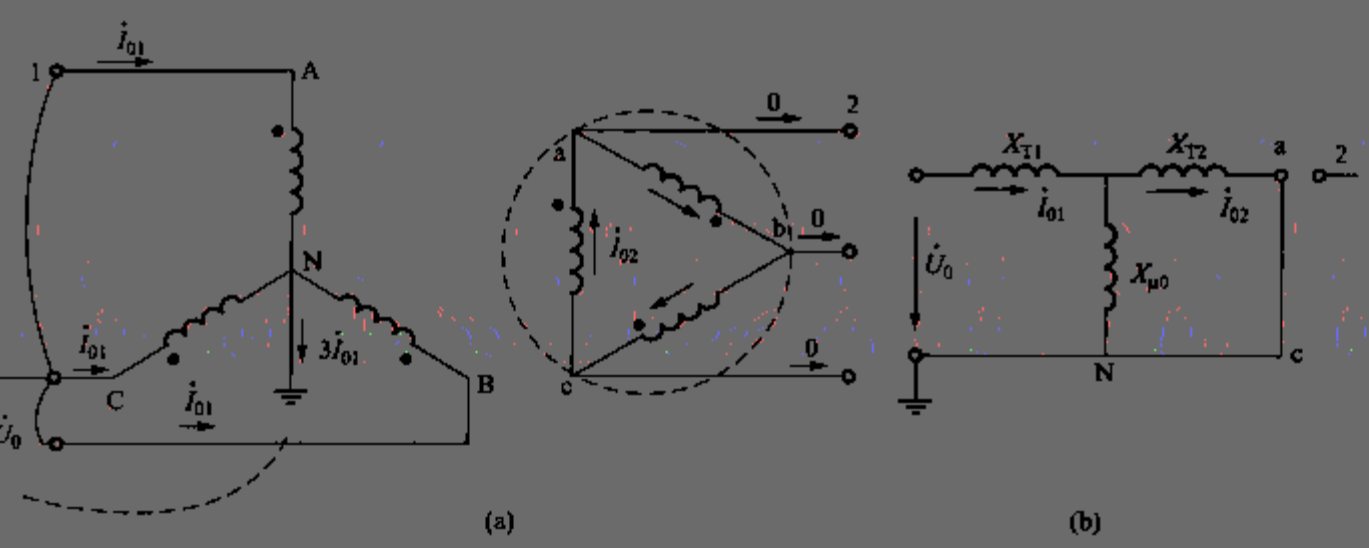


图 2－9　YN，d 接线组别变压器的零序等值电路

（a）零序电流回路；（b）零序等值电路（图中各量为标幺值）

更多专业资料请访问电建论坛

如下：

1）高压侧加零序电压，中、低压侧开路测得

$$X'_{T1}+X'_{\mu 0}=A$$

2）中压侧加零序电压，高、低压侧开路，测得

$$X'_{T2}+X'_{\mu 0}=B$$

3）高压侧加零序电压，中压侧对中性点短路，低压侧开路，测得

$$X'_{T1}+\frac{X'_{T2}X'_{\mu 0}}{X'_{T2}+X'_{\mu 0}}=C$$

根据以上数据，可求得

$$\left.\begin{aligned}X'_{\mu 0}&=\sqrt{B(A-C)}\\X'_{T1}&=A-\sqrt{B(A-C)}\\X'_{T2}&=B-\sqrt{B(A-C)}\end{aligned}\right\}$$

为使试验准确，在测试两个开路电抗值 A 和 B 时，应注意三点：

1）不是测定某一个零序电压下的两个开路电抗值 A 和 B，而是测定两组开路特性曲线 $A=f(U_0\%)$ 和 $B=f(U_0\%)$。绘出的是两条平滑曲线，可防止偶然性误差。

2）由 $A=f(U_0\%)$ 和 $B=f(U_0\%)$ 两条曲线取 A 和 B 值时，应保证在相同的 $U_0\%$ 下取值。

3）$U_0\%$ 的取值可为 20% ~30%，因在这样的零序电压下，A 和 B 值已基本趋于稳定了。需要说明，如果“三 Y”自耦变压器与其他中性点接地的非“三 Y”变压器并联运行或中压侧采用了外补偿措施，则对于高压侧为 220kV 的“三 Y”自耦变压器，也可以用 220 ~380V 低电压进行零序开路试验，测试 A 值和 B 值，求得的零序阻抗值可作为继电保护整定计算的依据。

应当指出，由于“三 Y”自耦变压器没有三角形绕组，且零序励磁阻抗较绕组漏抗大得多，因此这种变压器的零序阻抗为同容量有三角形绕组变压器的十几倍到二十几倍，并呈非线性。

5. 自耦变压器中性点经电抗 X_n 接地时的零序参数和等值电路

采用有名值讨论自耦变压器中性点经电抗 X_n 接地时的零序等值电路，假设零序励磁阻抗 $X_{\mu 0}\to\infty$。

图 2－17（a）示出中性点经电抗 X_n 接地的 YN，a，d 接线自耦变压器 1 侧加零序电压时的零序电流回路。设中性点电压为 $\dot U_N$，则 1、2 绕组端点对地的电压分别为

$$\dot U_1=\dot U_N+\dot U_{1N}$$

$$\dot U_2=\dot U_N+\dot U_{2N}$$

式中：$\dot U_{1N}$、$\dot U_{2N}$分别为 1、2 绕组端点对中性点 N 的电压，而 $\dot U_N=j3(\dot I_{01}-\dot I_{02})X_n$。将 $\dot U_2$ 归算到 1 侧，则有

$$\dot U'_2=(\dot U_N+\dot U_{2N})\frac{U_{av1}}{U_{av2}}$$

式中：U_{av1}、U_{av2}分别为 1、2 侧的平均额定电压。

当图 2－17（a）中的三角形绕组开路时，就构成了中性点经电抗接地的 YN，a 接线自

当输电线路通过零序电流时，有 $\dot{I}_{A0}=\dot{I}_{B0}=\dot{I}_{C0}$，各相零序电流经大地构成回路，形成三个“导线—大地”回路。就其中一个“导线—大地”回路的阻抗，就是输电线路的零序阻抗。单回长度输电线路零序阻抗的电阻等于 R 值加上大地回路的电阻（约为 0.05Ω/km）；电抗值等于一个“导线—大地”回路的自感抗再加上另两个“导线—大地”回路的互感抗，注意到自感抗值等于漏抗值 X_σ 与互感抗 X_M 之和，于是单位长度的零序阻抗 Z_0 为

$$\begin{aligned}Z_0&=R+0.05+\mathrm{j}[(X_\sigma+X_M)+2X_M]\\&=R+0.05+\mathrm{j}(X_\sigma+3X_M)\ (\Omega/\mathrm{km})\end{aligned}$$

显然，输电线路的零序阻抗比正序阻抗要大得多。

注意到零序电流可通过输电线路的架空地线返回，对大地返回的零序电流起分流作用。因架空地线零序电流与输电线路中的零序电流流向相反，起去磁作用，故架空地线的存在使输电线路的零序阻抗减小。

输电线路的零序阻抗与正序阻抗一样由实测得到。当无实测值时，对无架空地线的单回输电线路，零序阻抗可取正序阻抗的 3.5 倍；当有架空地线时，零序阻抗可取正序阻抗的 2 倍。

2. 平行双回线路的零序等值电路

（1）平行双回线路间的零序互阻抗。

由前分析得，输电线路可以看成三个“导线—大地”回路，当通过零序电流时，就一个“导线—大地”回路来说，另两个“导线—大地”回路产生助磁作用，于是输电线路的零序阻抗比正序阻抗大得多。如果是平行双回线路，则其中一条线路的一个“导线—大地”回路的零序阻抗必须再计及另一条线路三个“导线—大地”回路互阻抗对其的影响，从而使输电线路的零序阻抗进一步增大。

设 $Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$ 为两平行双回线路单位长度间的零序互阻抗，$Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$ 就是另一回线路单位长度三个“导线—大地”回路与本线路单位长度一个“导线—大地”回路间的互阻抗，即 $Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$ 等于一回线路的一个“导线—大地”回路与另一回线路一个“导线—大地”回路单位长度间互阻抗的三倍。于是，计及平行双回线路间的零序互阻抗的影响后，一条平行双回线路单位长度的零序阻抗 $Z_{0(\mathrm{I})}$ 可表示为

$$Z_{0(\mathrm{I})}=Z_0+Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0} \tag{2-58}$$

当然，两平行双回线路愈靠近，$Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$ 愈大。

（2）平行双回线路外部接地时的零序等值电路。

如图 2-18（a）所示，设 Ⅰ、Ⅱ 回线路单独存在时的单位长度零序阻抗分别为 $Z_{\mathrm{I}0}$、$Z_{\mathrm{II}0}$，平行双回线路的长度为 l（km），则电压方程为

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{U}_0&=\dot{I}_{\mathrm{I}0}Z_{\mathrm{I}0}l+\dot{I}_{\mathrm{II}0}Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l\\\Delta\dot{U}_0&=\dot{I}_{\mathrm{II}0}Z_{\mathrm{II}0}l+\dot{I}_{\mathrm{I}0}Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l\end{aligned}\right\} \tag{2-59}$$

改写式（2-59）为如下形式

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{U}_0&=(\dot{I}_{\mathrm{I}0}+\dot{I}_{\mathrm{II}0})Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l+\dot{I}_{\mathrm{I}0}[Z_{\mathrm{I}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]l\\\Delta\dot{U}_0&=(\dot{I}_{\mathrm{I}0}+\dot{I}_{\mathrm{II}0})Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l+\dot{I}_{\mathrm{II}0}[Z_{\mathrm{II}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]l\end{aligned}\right\} \tag{2-60}$$

按式（2-60）可作出平行双回线路的零序等值电路，如图 2-18（b）所示。

由此可得到平行双回线路的零序等值阻抗为

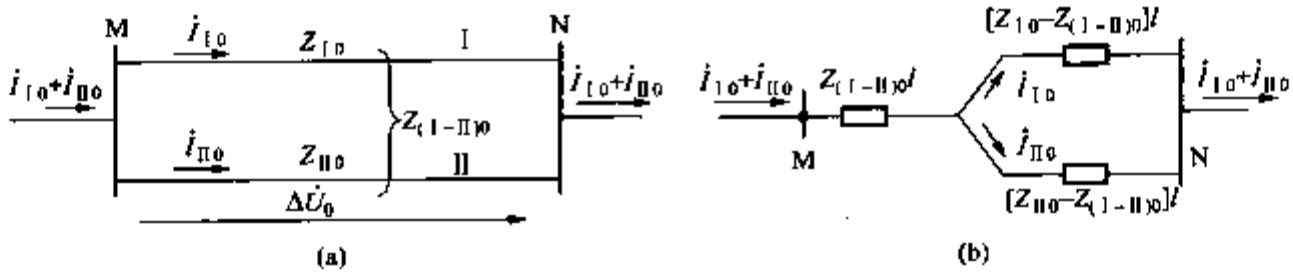


图 2－18 平行双回线路外部接地时的零序等值电路

（a）零序电流回路；（b）零序等值电路

$$Z_{0(2)}=Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l+\frac{[Z_{\mathrm{I}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}][Z_{\mathrm{II}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]}{[Z_{\mathrm{I}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]+[Z_{\mathrm{II}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]}\times l$$

如果两回线路相同，$Z_{\mathrm{I}0}=Z_{\mathrm{II}0}=Z_0$，则上式可改写为

$$Z_{0(2)}=\frac{1}{2}[Z_0+Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]\times l \tag{2-61}$$

其中每一回线路的零序等值阻抗 $Z_{0(1)}$ 为

$$Z_{0(1)}=[Z_0+Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}]\times l \tag{2-62}$$

可见，两回线路靠得愈近，线路的零序阻抗愈大。

（3）平行双回线路内部接地时的零序等值电路。

为讨论方便，假设平行双回线路内部接地故障发生在Ⅱ回线路上，如图 2－19（a）中的 K 点，M 母线左侧、N 母线右侧均为中性点接地的系统（相应的等值零序阻抗为 Z_{M0}、Z_{N0}）。可将 MN 母线间的平行双回线路分成两部分，l' 为其中的一个平行双回线路，l'' 为另外的一个平行双回线路。按图 2－18（b）示出的零序等值电路，可作出平行双回线路内部接地故障时的零序等值电路如图 2－19（b）所示，其中 $Z_{\mathrm{I}\sigma0}=Z_{\mathrm{I}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$，$Z_{\mathrm{II}\sigma0}=Z_{\mathrm{II}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$。

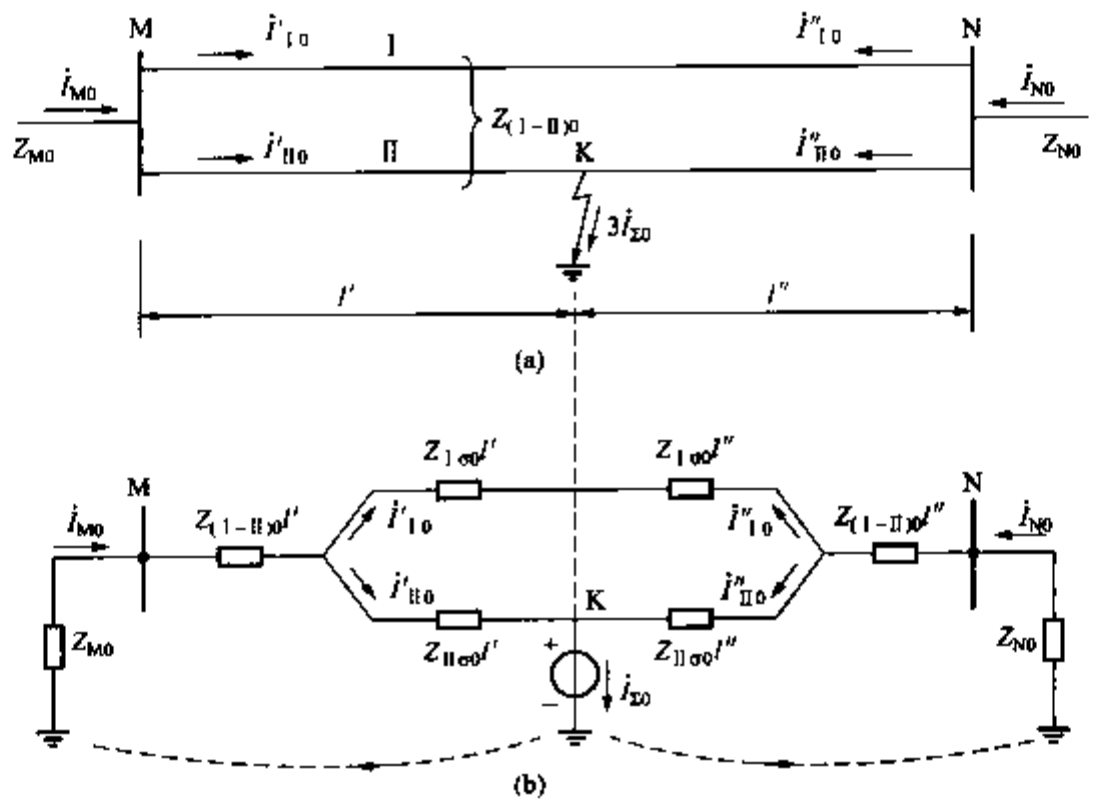


图 2－19 平行双回线路内部接地时的零序等值电路

（a）零序电流回路；（b）零序等值电路

（4）平行双回线路内部接地一侧三相跳闸后的零序等值电路。

当平行双回线路内部接地故障时，两侧继电保护可能出现不同时动作（纵续切除故

障），形成故障线一侧首先三相跳闸的情况，如图 2－20（a）所示。显然，K 点左侧只有 I 回线路，K 点右侧仍为平行双回线路，作出零序等值电路如图 2－20（b）所示。

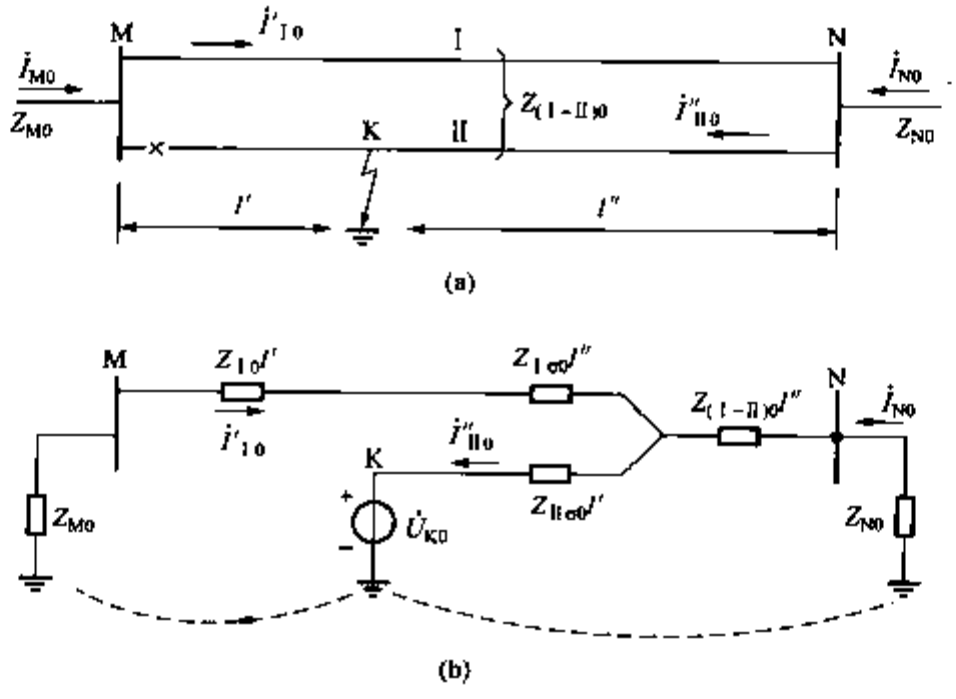


图 2－20 平行双回线路内部接地故障一侧三跳时的零序等值电路

（a）零序电流回路；（b）零序等值电路

（5）平行双回线路一回线停电检修时的零序等值电路。

当平行双回线路中的一回线停电检修时，平行双回线路就变成单回线路运行了。停电检修的线路两侧是可靠接地的，如图 2－21（a）所示，其中Ⅱ线路停电检修，Ⅰ线路运行。

令Ⅰ线路 M 母线到 N 母线间的零序电压降为 $\Delta\dot{U}_{I0}$，当线路长度为 l（km）时，列出方程为

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{I0}&=\dot{I}_{I0}Z_{I0}l-\dot{I}_{II0}Z_{(I-II)0}l\\0&=\dot{I}_{II0}Z_{II0}l-\dot{I}_{I0}Z_{(I-II)0}l\end{aligned}\right\}\tag{2-63}$$

消去 $\dot{I}_{II0}$ 得到

$$\Delta\dot{U}_{I0}=\dot{I}_{I0}\left[Z_{I0}-\frac{Z^2_{(I-II)0}}{Z_{II0}}\right]\times l\tag{2-64}$$

于是，Ⅰ线路的零序阻抗 Z'_{I0} 为

$$Z'_{I0}=\frac{\Delta\dot{U}_{I0}}{\dot{I}_{I0}}=\left[Z_{I0}-\frac{Z^2_{(I-II)0}}{Z_{II0}}\right]\times l\tag{2-65}$$

可见，零序阻抗减小了。这是因为 $\dot{I}_{II0}$ 与 $\dot{I}_{I0}$ 方向相反［见图 2－21（a）］，产生去磁作用造成的。由于零序阻抗减小，接地故障时会使通过的零序电流增大，为保证继电保护的选择性，在进行接地保护整定计算时应考虑这种运行方式。

将式（2－64）改写成如下形式

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{I0}&=\dot{I}_{I0}\left[Z_{I0}-Z_{(I-II)0}+Z_{(I-II)0}-\frac{Z^2_{(I-II)0}}{Z_{II0}}\right]\times l\\&=\dot{I}_{I0}Z_{I\sigma0}l+\dot{I}_{I0}\times\frac{Z_{(I-II)0}[Z_{II0}-Z_{(I-II)0}]}{Z_{II0}-Z_{(I-\ \ )0}+Z\ \ }\times l\end{aligned}$$

I 路 0 [illegible] 和 [illegible]

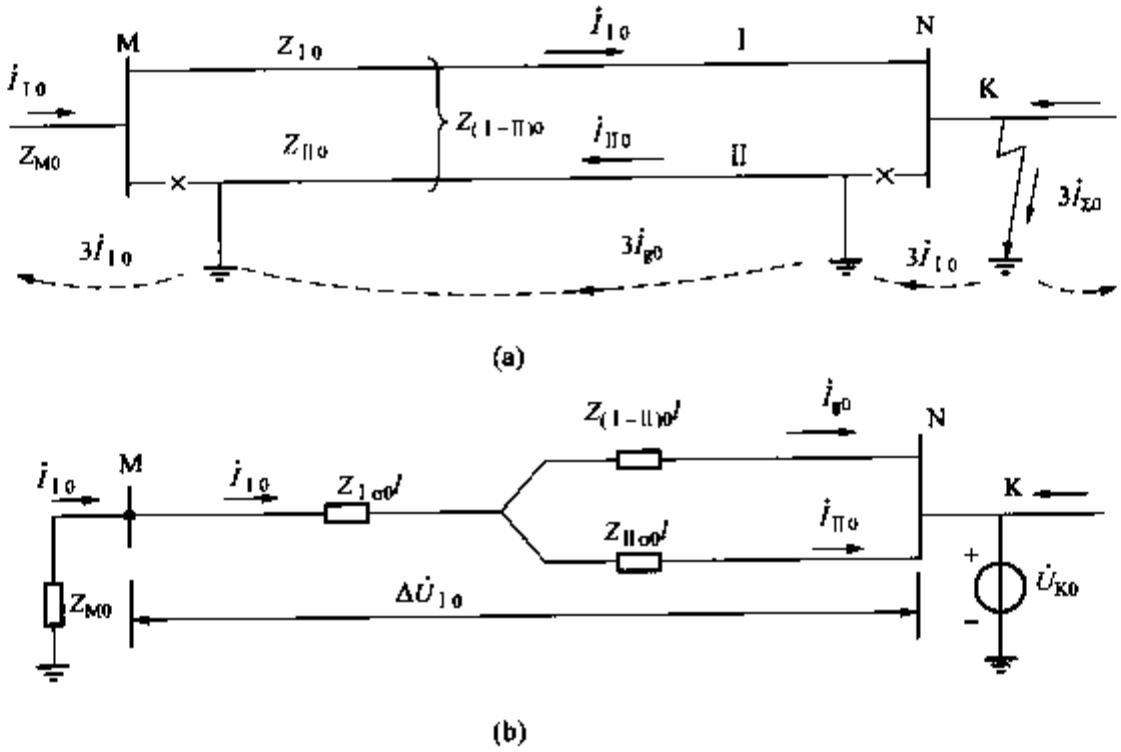


图 2－21 一回线路停电检修时的零序等值电路

（a）零序电流回路；（b）零序等值电路

作出相应零序等值电路如图 2－21（b）所示。由式（2－63）并计及 $\dot{I}_{10}=\dot{I}_{\mathrm{II}0}+\dot{I}_{g0}$，可以得到

$$\dot{I}_{\mathrm{II}0}Z_{\mathrm{II}\sigma0}l=\dot{I}_{g0}Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l$$

所以 $Z_{\mathrm{II}\sigma0}l$ 中流过电流为 $\dot{I}_{\mathrm{II}0}$，$Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}l$ 中流过电流为 $\dot{I}_{g0}$。

应当指出，在进行零序电流保护整定计算时，应考虑平行双回线路一回线停电检修两侧挂接地线的运行方式。如果零序电流保护Ⅰ段按平行双回线路两回线运行方式整定，则出现上述方式线路末端发生接地故障时，线路零序电流增大有造成保护误动作可能，因此应考虑这种运行方式。

对接地距离保护，当出现上述运行方式时，因零序阻抗减小使实际的 $K=\dfrac{Z_0-Z_1}{3Z_1}$ 减小，导致接地故障时母线电压降低，同时保护装置仍设定原有 K 值，从而继电器的测量阻抗减小，同样有可能造成保护区伸长发生非选择性动作。

（6）平行双回线路分裂运行时的零序等值电路。按图 2－18、图 2－19 的工作原理，可作出分裂运行的平行双回线路在不同地点接地故障时的零序等值电路，如图 2－22、图 2－23 所示，其中 $Z_{\mathrm{I}\sigma0}=Z_{\mathrm{I}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$，$Z_{\mathrm{II}\sigma0}=Z_{\mathrm{II}0}-Z_{(\mathrm{I}-\mathrm{II})0}$、$Z_{A0}$、$Z_{B0}$、$Z_{C0}$、$Z_{D0}$ 分别为系统 A、B、C、D 的零序等值阻抗。

需要指出，图 2－22（a）示出的平行双回线路间虽没有电的直接连接，但当接地故障点 K 靠近线路的一端时，会在另一线路中感应出较大的零序电流并使该线路两侧的零序方向元件处在动作状态，对该线路零序构成的保护带来不利影响。

（四）输电线路的序电容及序容抗

架空输电线路存在对地电容和线间电容，如图 2－24（a）所示。线间电容 C_M 可变换成等效星形电容，如图 2－24（b）所示，等效星形电路的每相电容量为线间电容量的三倍。

在零序电路中，同一点的三相导线是等电位的，所以零序电容 C_0 等于每相对地电容。

$$X_{re}=X_L\%\cdot\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}\ (\Omega) \tag{2-66}$$

式中：$X_L\%$ 为由制造厂给出的电抗百分值；U_N、I_N 为电抗器的额定线电压（kV）、额定电流（kA）。

当用标幺值表示时，标么阻抗值为

$$X_{re*}=X_L\%\cdot\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}\cdot\frac{S_B}{U_B^2} \tag{2-67}$$

式中：S_B 为选定的三相容量基准值；U_B 为该电抗器所处电压级的平均额定电压。

2. 分裂电抗器

图 2-25（a）示出了分裂电抗器及其电路，分裂电抗器实质上在电抗绕组中间设一个抽头，将绕组分成匝数相等的两部分，通常中间抽头接在电源侧。设每支路的自感抗为 X_S，两支路间互感抗为 X_M，则在图中极性下，各端点间的电压降可写为

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{0-1}&=j\dot{I}_1X_S-j\dot{I}_2X_M=j\dot{I}_1(X_S+X_M)-j\dot{I}X_M\\\dot{U}_{0-2}&=j\dot{I}_2X_S-j\dot{I}_1X_M=j\dot{I}_2(X_S+X_M)-j\dot{I}X_M\\\dot{U}_{1-2}&=-j\dot{I}_1(X_S+X_M)+j\dot{I}_2(X_S+X_M)\end{aligned}\right\} \tag{2-68}$$

根据式（2-68），作出等值电路如图 2-25（b）所示。当 X_S、X_M 以标幺值表示时，就构成了以标幺值表示的等值电路。

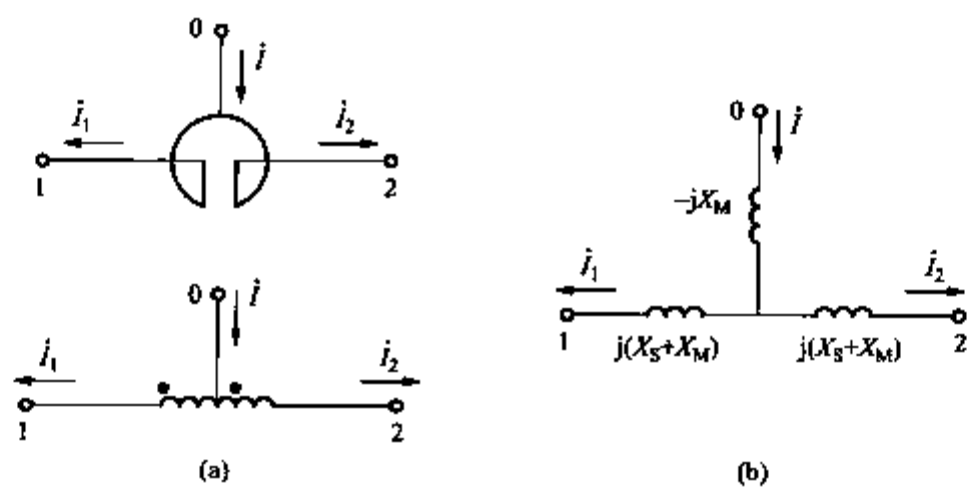


图 2-25 分裂电抗器及其等值电路

（a）分裂电抗器；（b）等值电路

有些场合，以两臂间的耦合系数 K_m 表示 X_M、X_S 间关系，$K_m=\frac{X_M}{X_S}$。一般 K_m 在 0.40～0.60 范围。

五、异步电动机

（一）正序参数和等值电路

图 2-26 示出了异步电动机稳态正序等值电路。其中 r_1、r_2' 为定子绕组、转子绕组折算到定子侧的电阻；$X_{1\sigma}$、$X_{2\sigma}'$ 为定子绕组、转子绕组折算到定子侧的漏抗；X_{ad} 为定子绕组、转子绕组相互之间的互感抗；$\frac{1-s}{s}r_2'$ 为机械负载相应的转子绕组的电阻（折算值），s 为转差率，$s=\frac{n_0-n}{n_0}$，而 n_0 与 n 分别为同步转速、异步电动机的实际转速。可以看出，异步电

动机的输入正序阻抗与转差率 s 密切相关，即与机械负载大小有关。

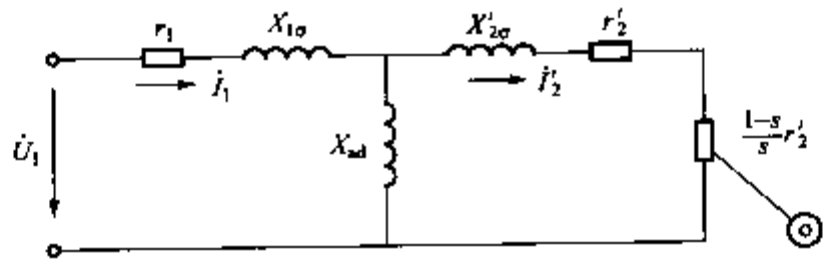


图 2－26　异步电动机稳态正序等值电路

电动机起动时，因 $s=1$，注意到 X_{ad} 远大于 $|r'_2+jX'_{2\sigma}|$，所以起动阻抗 Z_{st} 可表示为

$$Z_{st}=(r_1+r'_2)+j(X_{1\sigma}+X'_{2\sigma}) \tag{2-69}$$

相当于变压器的短路阻抗数值较小，故起动电流较大，通常可达 5～8 倍额定电流。

需要指出，电动机机端外部三相短路故障时，在 1～2 个周波时间内，因转子电流尚未衰减完，所以电动机变成临时电源向外供出短路电流（也称反馈电流），供出的三相短路电流可达 4.5 倍额定电流。外部短路故障切除，处于制动状态的电动机因电压突然恢复而自起动，自起动电流当然大于额定电流，但一般不会超过 5 倍额定电流。

（二）负序参数和等值电路

异步电动机机端存在负序电压时，电动机定子绕组通过相应负序电流建立负序磁场。因电动机转速为 n，所以负序转差率 s_2

$$s_2=\frac{n_0+n}{n_0}=\frac{2n_0-(n_0-n)}{n_0}=2-s \tag{2-70}$$

若负序电流作用时转子绕组电阻、漏抗没有变化或变化不大，则将图 2－26 中的 s 变为 s_2，就构成了异步电动机的负序等值电路，如图 2－27 所示。由图可见，对应于机械负载的等值电阻为负值，说明负序电压产生的是制动力矩。

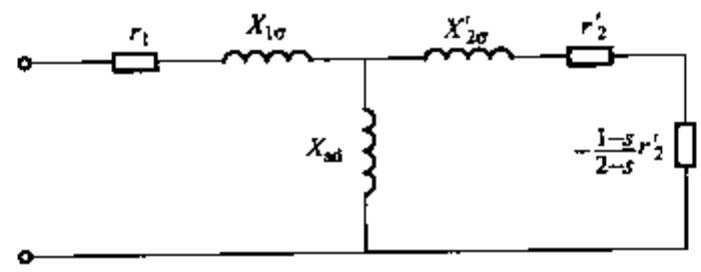


图 2－27　异步电动机的负序等值电路

因为
$$r'_2-\frac{1-s}{2-s}r'_2=\frac{1}{2-s}r'\approx\frac{1}{2}r'_2$$

计及
$$X_{ad}\gg\left|\frac{1}{2}r'_2+jX'_{2\sigma}\right|$$

所以异步电动机的负序阻抗 Z_2 可表示为

$$Z_2=\left(r_1+\frac{1}{2}r'_2\right)+j(X_{1\sigma}+X'_{2\sigma}) \tag{2-71}$$

与式（2－69）比较，可近似认为

$$Z_2\approx Z_{st} \tag{2-72}$$

此式说明，电动机的负序阻抗近似等于起动阻抗。

当电动机机端施加负序相电压 U_2 时，流入电动机的负序电流 I_2 为

$$I_2=\frac{U_2}{Z_2}=\frac{U_2}{Z_{st}}=K_{st}\frac{U_2}{U_{N\varphi}}I_N \tag{2-73}$$

式中：K_{st}为电动机起动电流倍数；$U_{N\varphi}$、I_N 为电动机额定相电压、额定电流。

计及 $I_{2*}=\frac{I_2}{I_N}$、$U_{2*}=\frac{U_2}{U_{N\varphi}}$，则式（2－73）变为

$$I_{2*}=K_{st}U_{2*} \tag{2-74}$$

此式说明，较小的负序电压就可产生较大的负序电流，当 $K_{st}=7$、$U_{2*}=20\%$ 时，则 I_2 可达 $1.4I_N$。

（三）零序参数

因异步电动机的定子绕组一般接成三角形或不接地星形，零序电流无法流通，所以异步电动机的零序阻抗为无穷大。

六、综合负荷

电力系统中的实际负荷由不同性质负荷组合而成，称为综合负荷。在正常情况下，综合负荷的正序阻抗可用 $X=1.2$ 的支路阻抗代替；短路瞬间的正序等值电路可用 $X''=0.35$、$E''_{[0]}=0.8$ 串联支路表示。当然，综合负荷供电电压等级三相短路时，与异步电动机相同，要供给短路电流，但供出的短路电流衰减更快。

综合负荷的负序阻抗即是次暂态电抗，即 $X_2=0.35$。综合负荷的零序阻抗可认为无穷大。

第五节 电力系统横向短路故障分析

电力系统发生短路故障时，短路点的电流（又称故障支路电流）流向不在输电线路方向，所以有时也把短路故障称做横向短路故障。

一、三相短路故障分析

（一）边界条件与特殊相

图2－28示出了K点金属性三相短路的情况（可接地，也可不接地）在K点将系统分割成两个部分。写出K点金属性三相短路的边界条件为

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}^{(3)}_{KA}&=0\\ \dot{U}^{(3)}_{KB}&=0\\ \dot{U}^{(3)}_{KC}&=0\end{aligned}\right\} \tag{2-75}$$

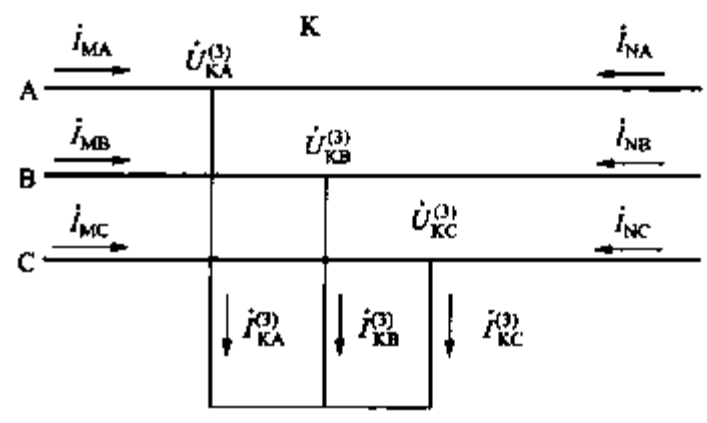


图2－28 K点金属性三相短路

因三相处在相同的情况，故任一相均可取特殊相（基准相），一般取A相。

（二）复合序网与故障分量网络

1. 复合序网

由式（2－75）可得故障点各序分量电压为

$$\dot{U}^{(3)}_{KA1}=\dot{U}^{(3)}_{KA2}=\dot{U}^{(3)}_{KA0}=0$$

于是图2－8（b）、（d）、（f）中的 K_1 和 N_1、K_2 和 N_2、K_0 和 N_0 短接，即复合序网就

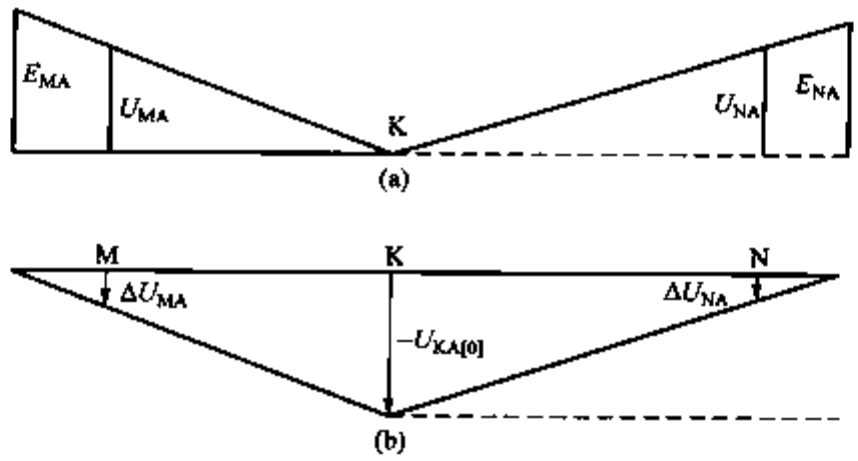


图 2－30 三相短路故障时正序电压分布

（a）正序电压分布；（b）故障分量电压分布

$$\Delta \dot{I}_{NA} = \frac{\dot{U}_{KA[0]}}{Z_{N1} + Z_{MK1}} \tag{2-78b}$$

$$\Delta \dot{U}_{MA} = -\Delta \dot{I}_{MA} Z_{M1} = -\frac{Z_{M1}}{Z_{M1} + Z_{MK1}} \cdot \dot{U}_{KA[0]} \tag{2-79a}$$

$$\Delta \dot{U}_{NA} = -\Delta \dot{I}_{NA} Z_{N1} = -\frac{Z_{N1}}{Z_{N1} + Z_{NK1}} \cdot \dot{U}_{KA[0]} \tag{2-79b}$$

可以看出，M、N 母线上的突变量电压是故障分量电动势 $\dot{U}_{KA[0]}$ 在母线上的分压值，当故障点靠近母线时，数值愈高。

图 2－30（b）示出了故障分量电压的分布，K 点的故障分量电压最高，逐渐向电源中性点降低到零；若 N 侧无电源，则 N 侧故障分量电压不降低，分布如图中虚线所示。

（四）序电流分布

因为三相短路故障仅有正序分量，所以序电流的分布即是正序电流的分布。图 2－1 中 K 点三相短路故障时，M 侧的正序电流（以 A 相为例）可表示为

$$\dot{I}_{MA} = \dot{I}_{loa \cdot A} + \Delta \dot{I}_{MA} = \dot{I}_{loa \cdot A} + C_{1M} \dot{I}_{KA}^{(3)} \tag{2-80}$$

其中

$$\dot{I}_{loa \cdot A} = \frac{\dot{E}_{MA} - \dot{E}_{NA}}{Z_{M1} + Z_{MN1} + Z_{N1}} = \frac{\dot{E}_{MA} - \dot{E}_{NA}}{Z_{11}}$$

$$Z_{11} = Z_{M1} + Z_{MN1} + Z_{N1}$$

$$C_{1M} = \frac{Z_{N1} + Z_{NK2}}{Z_{11}}$$

C_{1M} 是 K 点短路故障时 M 侧正序电流分配系数。应当指出，$C_{1M} \dot{I}_{KA}^{(3)}$ 与 $\dot{I}_{loa \cdot A}$ 有几乎垂直的相位关系；在一般情况下，$|C_{1M} \dot{I}_{KA}^{(3)}|$ 远比 $|\dot{I}_{loa \cdot A}|$ 大，因此在短路计算中可将负荷电流不计。

（五）保护安装处的相电流差突变量

由式（2－80）可得到图 2－1 中 K 点三相短路线路 M 侧的突变量电流为

$$\Delta \dot{I}_{MA} = \dot{I}_{MA} - \dot{I}_{loa \cdot A} = C_{1M} \dot{I}_{KA}^{(3)}$$

$$\Delta \dot{I}_{MB} = \dot{I}_{MB} - \dot{I}_{loa \cdot B} = C_{1M} \dot{I}_{KB}^{(3)}$$

$$\Delta \dot{I}_{MC} = \dot{I}_{MC} - \dot{I}_{loa \cdot C} = C_{1M} \dot{I}_{KC}^{(3)}$$

计及$|\dot{I}_{KA}^{(3)}-\dot{I}_{KB}^{(3)}|=|\dot{I}_{KB}^{(3)}-\dot{I}_{KC}^{(3)}|=|\dot{I}_{KC}^{(3)}-\dot{I}_{KA}^{(3)}|=\sqrt{3}I_K^{(3)}$，得到三个相电流差突变量为

$$|\Delta\dot{I}_{MAB}|=|\Delta\dot{I}_{MA}-\Delta\dot{I}_{MB}|=\sqrt{3}C_{1M}I_K^{(3)} \tag{2-81a}$$

$$|\Delta\dot{I}_{MBC}|=|\Delta\dot{I}_{MB}-\Delta\dot{I}_{MC}|=\sqrt{3}C_{1M}I_K^{(3)} \tag{2-81b}$$

$$|\Delta\dot{I}_{MCA}|=|\Delta\dot{I}_{MC}-\Delta\dot{I}_{MA}|=\sqrt{3}C_{1M}I_K^{(3)} \tag{2-81c}$$

三个相电流差突变量相等，且数值很大。

（六）保护安装处突变量电压、电流间相位关系

因讨论的是三相短路故障，所以突变量电压、电流间的相位关系就是正序电压突变量、正序电流突变量间的相位关系。

1. 保护方向上三相短路故障

由式（2-79a）得到

$$\arg\frac{\Delta U_{\varphi1}}{\Delta\dot{I}_{\varphi1}}=\arg(-Z_{M1})=180^\circ+\arg Z_{M1} \tag{2-82}$$

当$\arg Z_{M1}=70^\circ\sim80^\circ$时，上式变为

$$\arg\frac{\Delta\dot{U}_{\varphi1}}{\Delta\dot{I}_{\varphi1}}=-(110^\circ\sim100^\circ) \tag{2-83}$$

即$\Delta\dot{U}_{\varphi1}$滞后$\Delta\dot{I}_{\varphi1}$的角度是$110^\circ\sim100^\circ$。其中$\Delta\dot{U}_{\varphi1}$是保护安装处正序相电压突变量，$\Delta\dot{I}_{\varphi1}$是母线流向被保护线路的正序相电流突变量。由式（2-82）可见，$\Delta\dot{U}_{\varphi1}$与$\Delta\dot{I}_{\varphi1}$间的相位关系仅决定于保护反方向上的正序阻抗角，与故障点的状况无关，即与故障点是否存在过渡电阻无关。

2. 保护反方向上三相短路故障

保护反方向上三相短路故障，对线路M侧保护来说，图2-29中故障电动势作用点移到M母线左侧，于是有关系式

$$\Delta\dot{U}_{MA}=\Delta\dot{I}_{MA}(Z_{MK1}+Z_{NK1}+Z_{N1})=\Delta\dot{I}_{MA}(Z_{MN1}+Z_{N1})$$

即

$$\arg\frac{\Delta\dot{U}_{\varphi1}}{\Delta\dot{I}_{\varphi1}}=\arg(Z_{MN1}+Z_{N1})=70^\circ\sim80^\circ \tag{2-84}$$

$\Delta\dot{U}_{\varphi1}$超前$\Delta\dot{I}_{\varphi1}$的角度是$70^\circ\sim80^\circ$，并且超前的角度决定于保护方向上的正序阻抗角，同样与故障点是否存在过渡电阻无关。

如果将$\Delta\dot{I}_{\varphi1}$向滞后方向移相15°，则可构成正序突变量方向元件的动作判据，即

$$0^\circ<\arg\left(\frac{\Delta\dot{U}_{\varphi1}}{\Delta\dot{I}_{\varphi1}e^{-j15^\circ}}\right)<180^\circ \quad \text{（反方向元件）} \tag{2-85a}$$

$$180^\circ<\arg\left(\frac{\Delta\dot{U}_{\varphi1}}{\Delta\dot{I}_{\varphi1}e^{-j15^\circ}}\right)<360^\circ \quad \text{（正方向元件）} \tag{2-85b}$$

由于故障点的正序突变量电压最高，故方向元件不存在电压死区问题；相反故障点愈靠近保护安装处，方向元件的灵敏度愈高。

（七）故障点电弧压降

三相短路的过渡电阻在大多数情况下是电弧电阻，当故障电流在相当大范围内变化时，

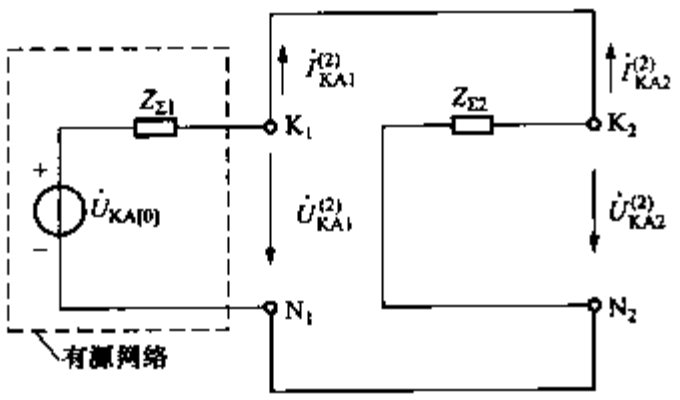


图 2－32　K 点 BC 相短路故障时的复合序网

向接入正常运行相间电压 $\dot{U}_{KBC[0]}$ 造成。于是，K 点 BC 相短路故障可看成电力系统正常运行方式和仅在 K 点反向接入的 $\dot{U}_{KBC[0]}$ 故障电动势作用的故障分量网络的叠加。图 2－33 示出了 K 点 BC 相短路故障的故障分量网络，该网络是一个无源网络，没有负荷分量电流、电压，仅有故障分量电流、电压。在图中 $\Delta\dot{I}_{MB}$、$\Delta\dot{I}_{MC}$、$\Delta\dot{I}_{NB}$、$\Delta\dot{I}_{NC}$ 表示故障分量电流、$\Delta\dot{U}_{MBC}$、$\Delta\dot{U}_{NBC}$ 表示故障分量电压。

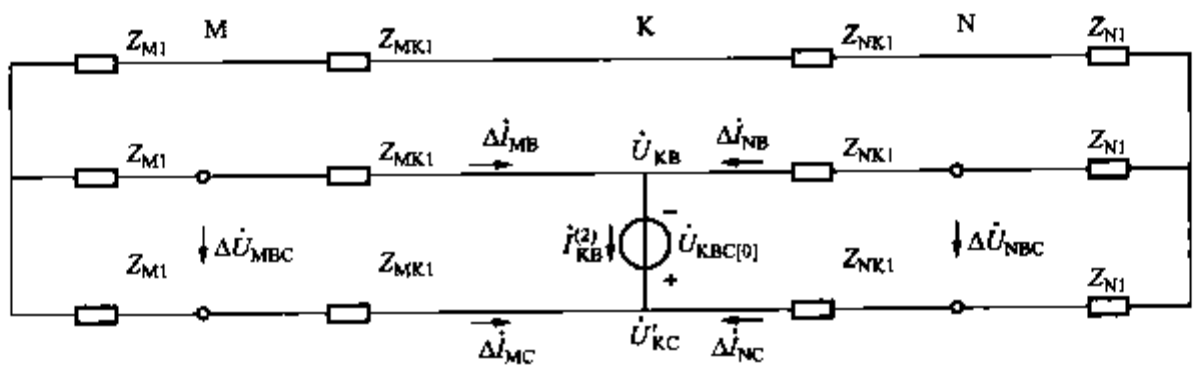


图 2－33　K 点 BC 相短路故障时的故障分量网络

（三）故障点电流、电压

1. 故障电流

由图 2－32 求得 $\dot{I}^{(2)}_{KA1}$ 为

$$\dot{I}^{(2)}_{KA1}=\frac{\dot{U}_{KA[0]}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}} \tag{2-89}$$

计及式（2－87）得到故障电流为

$$\dot{I}^{(2)}_{KB}=-\dot{I}^{(2)}_{KC}=a^2\dot{I}^{(2)}_{KA1}+a\dot{I}^{(2)}_{KA2}=(a^2-a)\dot{I}^{(2)}_{KA1}=-\mathrm{j}\sqrt{3}\frac{\dot{U}_{KA[0]}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}} \tag{2-90}$$

当 $Z_{\Sigma1}=Z_{\Sigma2}$ 时，上式变为

$$\dot{I}^{(2)}_{KB}=-\dot{I}^{(2)}_{KC}=-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{\dot{U}_{KA[0]}}{Z_{\Sigma1}} \tag{2-91}$$

与式（2－76）比较，可得到两相短路电流等于同一点三相短路电流的 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍。

2. 故障点电压

由图 2－32 求得 $\dot{U}^{(2)}_{KA1}$、$\dot{U}^{(2)}_{KA2}$ 为

$$U^{(2)}_{KA1}=\dot{U}^{(2)}_{KA2}=\frac{Z_{\Sigma2}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}}\cdot\dot{U}_{KA[0]} \tag{2-92}$$

于是故障点的三相电压为

$$U^{(2)}_{KA}=2\dot{U}^{(2)}_{KA1}=\frac{2Z_{\Sigma2}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}}\cdot\dot{U}_{KA[0]} \tag{2-93a}$$

N 侧的 $\Delta\dot{I}_N=\Delta(\dot{I}_{NA}+K3\dot{I}_0)$，$\Delta\dot{U}_{MA}$、$\Delta\dot{U}_{NA}$为 M、N 母线的相电压突变量。

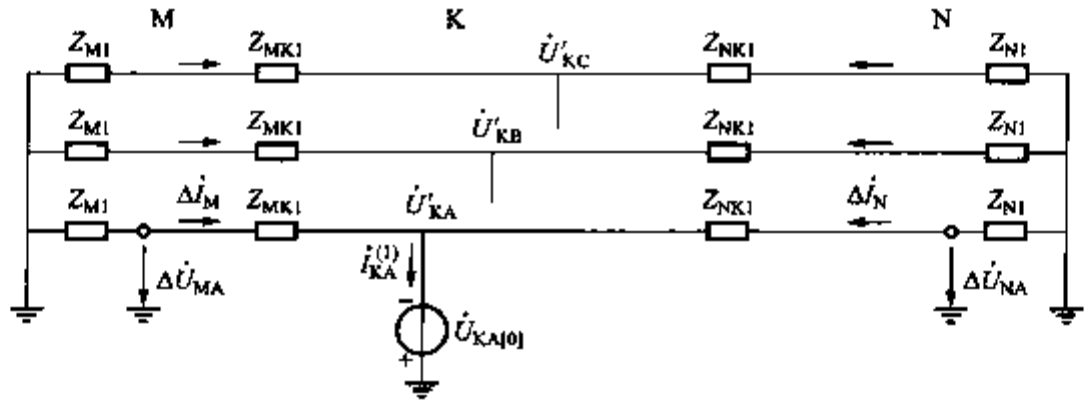


图 2－40 K 点 A 相接地时的故障分量网络

（三）故障点电流、电压

1. 故障电流

由图 2－39 求得

$$\dot{I}^{(1)}_{KA1}=\dot{I}^{(1)}_{KA2}=\dot{I}^{(1)}_{KA0}=\frac{\dot{U}_{KA[0]}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}+Z_{\Sigma0}} \tag{2-114}$$

接地故障电流为

$$\dot{I}^{(1)}_{KA}=\frac{3\dot{U}_{KA[0]}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}+Z_{\Sigma0}} \tag{2-115}$$

同一点三相短路电流由式（2－76）得到为 $I_K^{(3)}=\dfrac{U_{KA[0]}}{Z_{\Sigma1}}$，如果 $Z_{\Sigma1}=Z_{\Sigma2}$，则式（2－115）可表示为

$$I_K^{(1)}=\frac{3I_K^{(3)}}{2+\dfrac{Z_{\Sigma0}}{Z_{\Sigma1}}} \tag{2-116}$$

$I_K^{(1)}$ 与 $I_K^{(3)}$ 的比值为

$$\frac{I_K^{(1)}}{I_K^{(3)}}=\frac{3}{2+\dfrac{Z_{\Sigma0}}{Z_{\Sigma1}}} \tag{2-117}$$

可以看出，当 $Z_{\Sigma0}<Z_{\Sigma1}$时，有 $I_K^{(1)}>I_K^{(3)}$；当 $Z_{\Sigma0}=Z_{\Sigma1}$时，有 $I_K^{(1)}=I_K^{(3)}$；当 $Z_{\Sigma0}>Z_{\Sigma1}$时，有 $I_K^{(1)}<I_K^{(3)}$。

2. 故障点电压

因 $\dot{U}^{(1)}_{KA}=0$，所以只需分析两非故障相电压。由图 2－39 得

$$\dot{U}^{(1)}_{KA0}=-\dot{I}^{(1)}_{KA0}Z_{\Sigma0}=-\dot{I}^{(1)}_{KA1}Z_{\Sigma0}$$

$$\dot{U}^{(1)}_{KA2}=-\dot{I}^{(1)}_{KA2}Z_{\Sigma2}=-\dot{I}^{(2)}_{KA1}Z_{\Sigma2}$$

$$\dot{U}^{(1)}_{KA1}=-\dot{I}^{(1)}_{KA1}(Z_{\Sigma2}+Z_{\Sigma0})$$

于是 $\dot{U}^{(1)}_{KB}$与 $\dot{U}^{(1)}_{KC}$可表示为

$$\begin{aligned}\dot{U}^{(1)}_{KB}&=a^2\dot{U}^{(1)}_{KA1}+a\dot{U}^{(1)}_{KA2}+\dot{U}^{(1)}_{KA0}\\&=\frac{(a^2-a)Z_{\Sigma2}+(a^2-1)Z_{\Sigma0}}{Z_{\Sigma1}+Z_{\Sigma2}+Z_{\Sigma0}}\cdot\dot{U}_{KA[0]}\end{aligned} \tag{2-118a}$$

改写 ΔZ 为如下形式

$$\Delta Z=\frac{3\dot{I}_{KA1}^{(1)}}{\dot{I}_{loa\cdot A}+C_{1M}\dot{I}_{KA1}^{(1)}+C_{2M}\dot{I}_{KA2}^{(1)}+C_{0M}\dot{I}_{KA0}^{(1)}+3KC_{0M}\dot{I}_{KA0}^{(1)}}\cdot R_g$$
$$=\frac{3R_g}{[2C_{1M}+(1+3K)C_{0M}]+\dfrac{3\dot{I}_{loa\cdot A}}{\dot{I}_{KA}^{(1)}}} \tag{2-153}$$

当 K 点金属性短路故障时，$R_g=0$，有 $\Delta Z=0$，此时 $Z_m=Z_{MK1}$。在 $R_g\neq0$ 情况下，若空载下发生单相接地，$\dot{I}_{loa\cdot A}=0$，则 $\Delta Z_1=\dfrac{3R_g}{2C_{1M}+(1+3K)C_{0M}}$ 为纯电阻，$Z_m=Z_{MK1}+\Delta Z_1$；当 M 侧为送电侧时，由式（2－1a）确定的负荷电流 $\dot{I}_{loa\cdot A}$ 超前图 2－46 中的故障电流 $\dot{I}_{KA}^{(1)}$，于是 ΔZ 中分母幅角为“＋”，故 ΔZ 呈阻容性（用 ΔZ_2 表示），$Z_{M2}=Z_{MK1}+\Delta Z_2$；当 M 侧为受电侧时，由式（2－1a）确定的 $\dot{I}_{loa\cdot A}$ 滞后图 2－46 中的 $\dot{I}_{KA}^{(1)}$，ΔZ 中分母幅角为“－”，故 ΔZ 呈阻感性（用 ΔZ_3 表示），$Z_{m3}=Z_{MK1}+\Delta Z_3$。$\Delta Z$、$Z_m$ 如图 2－47 所示。

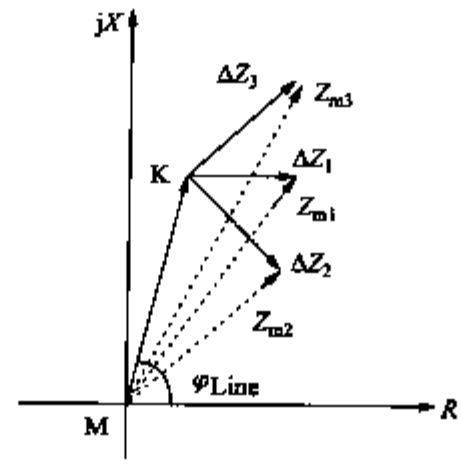


图 2－47 单相经 R_g 接地时的 Z_m

需要指出的是，接地故障过渡电阻大，因此过渡电阻对零序电流保护、接地距离保护等都有较大的影响，应采取相应措施或专门技术来改善或消除过渡电阻的影响。

（十）中性点不接地电网发生单相接地

图 2－48 示出了中性点不接地电网，其中 $\dot{E}_A$、$\dot{E}_B$、$\dot{E}_C$ 是发电机电动势或是变压器二次侧感应电动势，$C_1\sim C_4$ 分别是线路 1～4 每相对地电容。当线路 4 的 K 点 A 相接地时，其一是综合零序阻抗远大于综合正序、负序阻抗；其二是接地电流不大，正序电流、负序电流在综合正序、负序阻抗上的压降远小于零序电流在综合零序阻抗上的压降；其三，零序电流在线路零序阻抗上的压降远小于零序电流在线路对地电容上的压降。

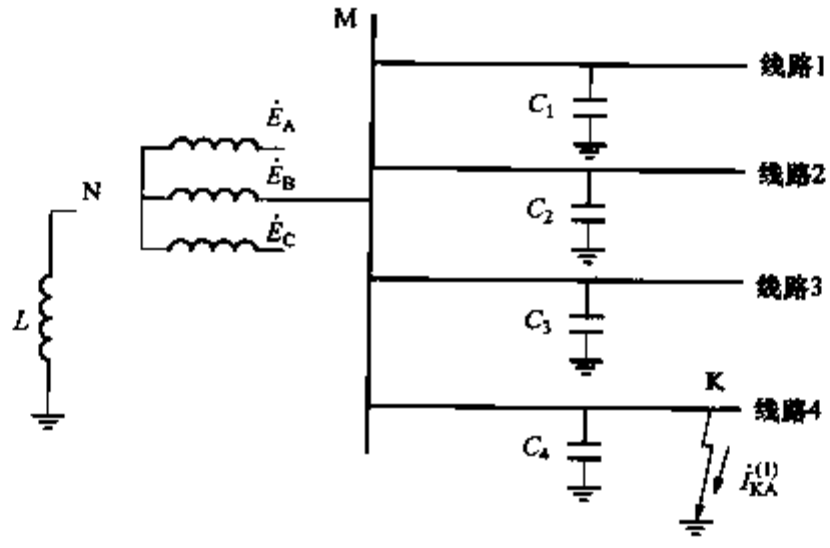


图 2－48 中性点不接地电网

因此，在单相接地的复合序网中，完全可令 $Z_{\Sigma1}=0$、$Z_{\Sigma2}=0$。并不计线路元件的零序阻抗，作出 K 点 A 相接地的复合序网如图 2－49 所示。

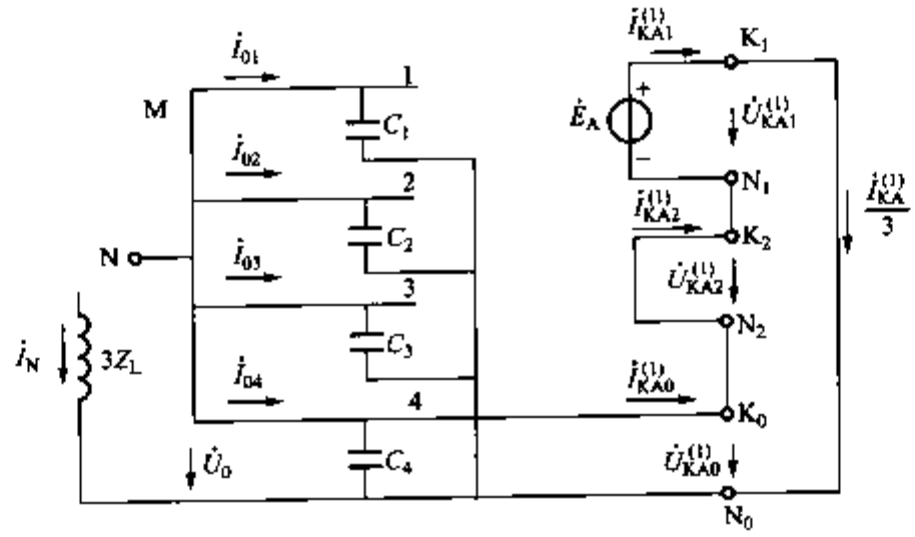


图 2－49　K 点 A 相接地时的复合序网

1. 单相接地电流

由复合序网得到

$$\dot{I}^{(1)}_{KA1}=\dot{I}^{(1)}_{KA2}=\dot{I}^{(1)}_{KA0}=j\omega(C_1+C_2+C_3+C_4)\dot{E}_A=j\omega C_\Sigma\dot{E}_A$$

所以接地电流 $\dot{I}^{(1)}_{KA}$ 为

$$\dot{I}^{(1)}_{KA}=j3\omega C_\Sigma\dot{E}_A \tag{2-154}$$

式（2－154）说明，接地电流为电容电流，超前接地相该相电动势 90°相角，接地电流为该电网所有设备对地电容电流之和。当该电网中具有较多电缆线路时，接地电流就增大。

2. 各序电压

由复合序网可得到各序电压为

$$\dot{U}^{(1)}_{KA1}=\dot{E}_A \tag{2-155a}$$

$$\dot{U}^{(1)}_{KA2}=0 \tag{2-155b}$$

$$\dot{U}^{(1)}_{KA0}=-\dot{E}_A \tag{2-155c}$$

可见，中性点不接地电网发生单相接地时，正序电压保持原有数值，因此可以继续供电给用户，但因非故障相电压升高$\sqrt{3}$倍，等于线电压值，为避免不同名相再次接地，不允许长期运行，一般最长时间不超过 2h。中性点不接地电网发生单相接地时不存在负序电压分量，零序电压等于 $-\dot{E}_A$。

检测零序电压可用来反应接地故障。此时电压互感器开口三角形绕组上电压 U 为

$$U=U_0\times\frac{100}{3E_\varphi}\times3=100\text{V}$$

3. 故障线路、非故障线路的零序电流

在图 2－48 中，线路 1、2、3 为非故障线路，线路 4 为故障线路。由图 2－49 可得到非故障线路、故障线路的零序电流为

$$\dot{I}_{01}=j\omega C_1\dot{U}_0 \tag{2-156a}$$

$$\dot{I}_{02}=j\omega C_2\dot{U}_0 \tag{2-156b}$$

$$\dot{I}_{03}=j\omega C_3\dot{U}_0 \tag{2-156c}$$

$$\dot{I}_{04}=-(\dot{I}_{01}+\dot{I}_{02}+\dot{I}_{03})=-j\omega(C_1+C_2+C_3)\dot{U}_0 \tag{2-156d}$$

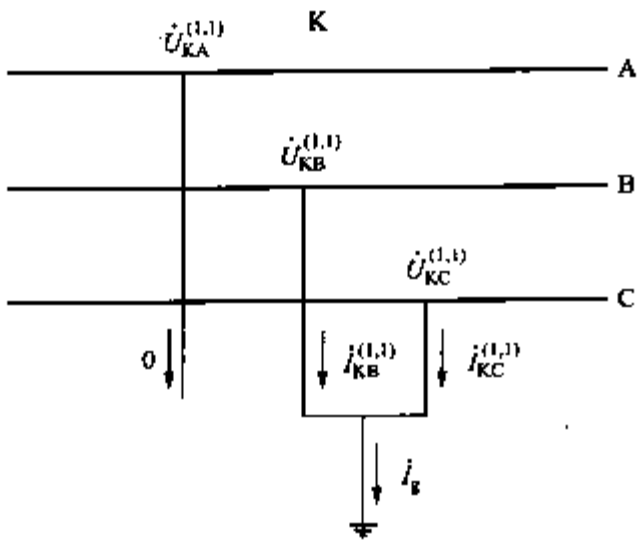


图2－50 K点BC相金属性接地

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{KA}^{(1,1)}&=0\\ \dot{U}_{KB}^{(1,1)}&=0\\ \dot{U}_{KC}^{(1,1)}&=0\end{aligned}\right\}\qquad(2-165)$$

特殊相是A相，CA相接地时特殊相是B相，AB相接地时特殊相是C相。特殊相是非故障相。

（二）复合序网与故障分量网络

1. 复合序网

将式（2－165）用特殊相A相序分量表示为

$$\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}+\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}+\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}=0\qquad(2-166a)$$

$$\dot{U}_{KA1}^{(1,1)}=\dot{U}_{KA2}^{(1,1)}=\dot{U}_{KA0}^{(1,1)}=\frac{\dot{U}_{KA}^{(1,1)}}{3}\qquad(2-166b)$$

由式（2－166）作出复合序网如图2－51所示，是特殊相正序、负序、零序网络并联。

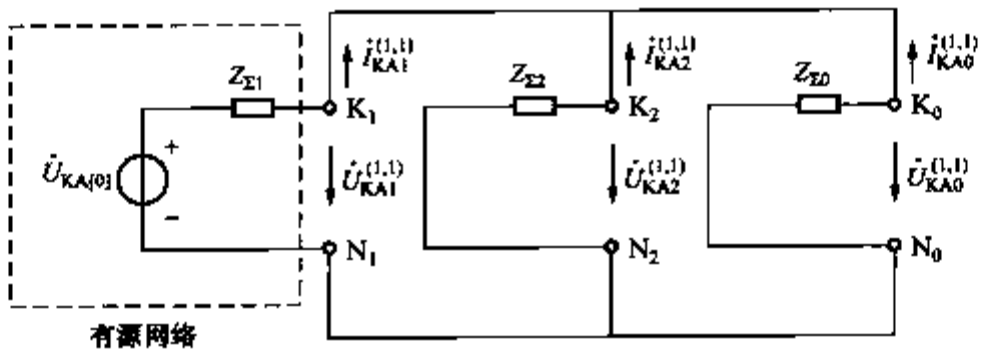


图2－51 BC相接地时的复合序网

2. 故障分量网络

图2－1中K点BC两相接地短路，可以看成K点同时B、C相单相接地，与图2－40类似，作出BC两相接地时的故障分量网络如图2－52所示。

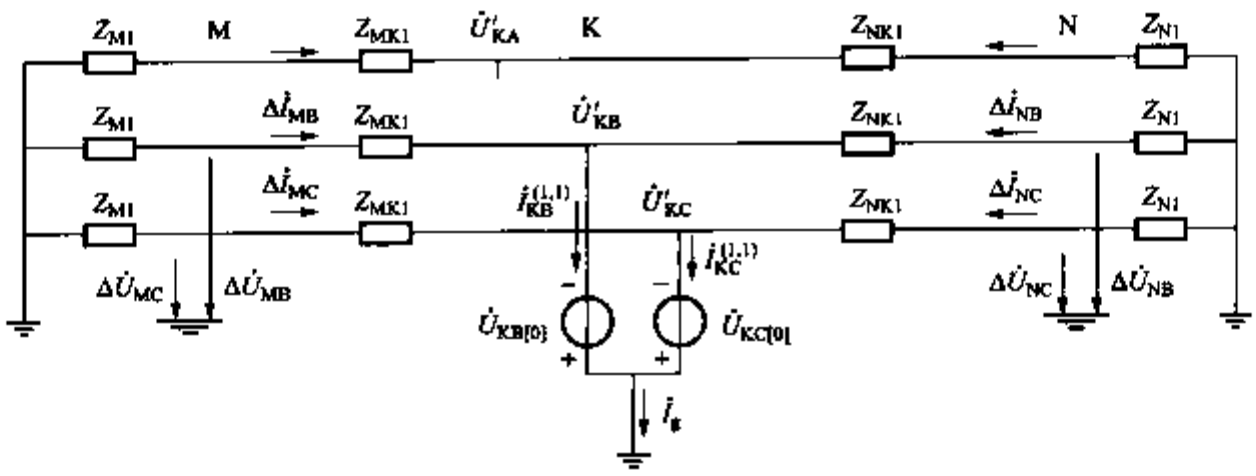


图2－52 BC相接地时的故障分量网络

当然，系统中各元件的零序阻抗与正序阻抗之比相同；同时$\Delta\dot{I}_{MB}$、$\Delta\dot{I}_{MC}$、$\Delta\dot{I}_{NB}$、$\Delta\dot{I}_{NC}$均为带有零序电流补偿的相电流突变量，即$\Delta(\dot{I}_{\varphi}+K3\dot{I}_0)$形式。

根据上述规律可作出电流相量。当 $R_g=0$ 时，就是两相金属性接地短路，在图 2－57（a）中，$\dot{I}_{KB'}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KC}^{(1,1)}$ 如图中 OB′、OC′（其画法参见图 2－53）；当 $R_g=\infty$ 时，就是两相相间短路，$\dot{I}_{KB}^{(2)}$、$\dot{I}_{KC}^{(2)}$ 如图中 OB、OC（其画法参见图 2－34）。因此，$R_g=0\sim\infty$ 变化时，$\dot{I}_{KB'}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KC}^{(1,1)}$ 相量端点变化轨迹如图 2－57（a）中圆弧所示，相应的 $\dot{I}_g$ 相量端点为以 OD 为弦的圆弧。

对于故障点非故障相电压 $\dot{U}_{KA'}^{(1,1)}$，在图 2－53 基础上，当 $R_g=0\sim\infty$ 变化时，如图 2－57（b）中圆弧所示。对于故障相电压，$R_g=0$ 时，有 $\dot{U}_{KB'}^{(1,1)}=0$、$\dot{U}_{KC'}^{(1,1)}=0$，在图 2－57（b）中为 O 点；$R_g=\infty$ 时，相当于 BC 两相短路，$\dot{U}_{KB}^{(2)}=\dot{U}_{KC}^{(2)}=-\frac{1}{2}\dot{U}_{KA[0]}$（参见图 2－34），相量端点为图 2－57（b）中的 G 点。因此，$R_g=0\sim\infty$ 变化时，$\dot{U}_{KB'}^{(1,1)}$、$\dot{U}_{KC'}^{(1,1)}$ 相量端点变化轨迹如图 2－57（b）中 OG 左侧圆弧。

将图 2－57 与图 2－53 比较，计及 R_g 影响后，相量关系发生了较大的变化，但 $\dot{U}_{KB'}^{(1,1)}$、$\dot{U}_{KC'}^{(1,1)}$ 始终与 $\dot{I}_g$ 相量平行。

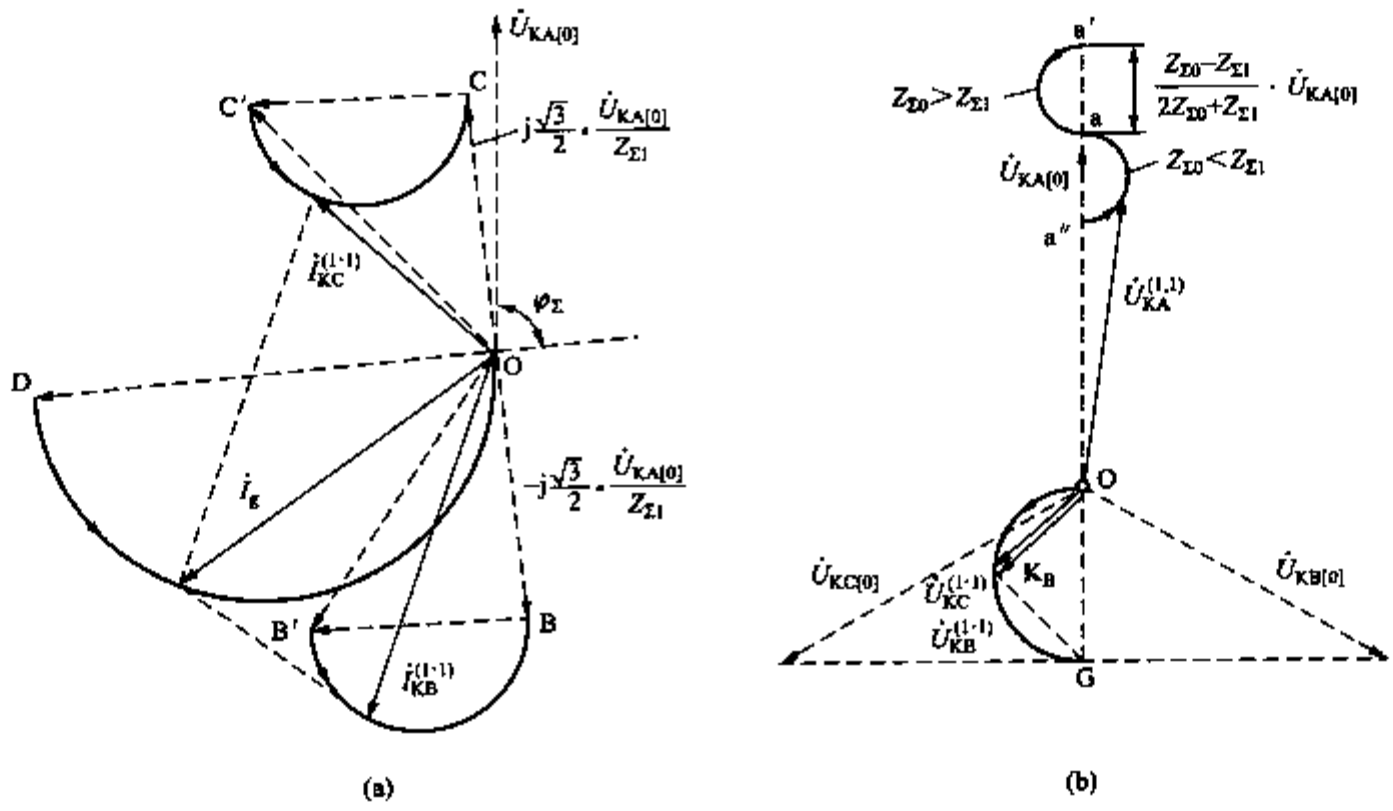


图 2－57　BC 相经 R_g 接地时故障点的电流、电压相量关系

（a）电流相量；（b）电压相量

2. 对非故障相各序电流相位关系的影响

K 点 BC 相金属性接地短路，即 $R_g=0$，由式（2－167）可见，$\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}$ 同相位并在 $\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}$ 的反方向上［$\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}$ 在一条直线上］。当 $Z_{\Sigma1}>Z_{\Sigma0}$ 时，有 $|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|>|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$；当 $Z_{\Sigma1}<Z_{\Sigma0}$ 时，有 $|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|<|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$。反映在图 2－58 中，OA、OC、OD 代表 $\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}$、$\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}$ 相量，并且有 $|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|>|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$（$Z_{\Sigma0}<Z_{\Sigma1}$ 时）。

当 $R_g=\infty$ 时，相当于 K 点 BC 相短路，$\dot{I}_{KA1}^{(2)}$ 与 $\dot{I}_{KA2}^{(2)}$ 反相位且 $|\dot{I}_{KA1}^{(2)}|=|\dot{I}_{KA2}^{(2)}|$。比较式（2－89）、式（2－167a）可见，$|\dot{I}_{KA1}^{(2)}|<|\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}|$，反映在图 2－58 中，OB 代表 $|\dot{I}_{KA1}^{(2)}|$ 相

量（OB < OA）。

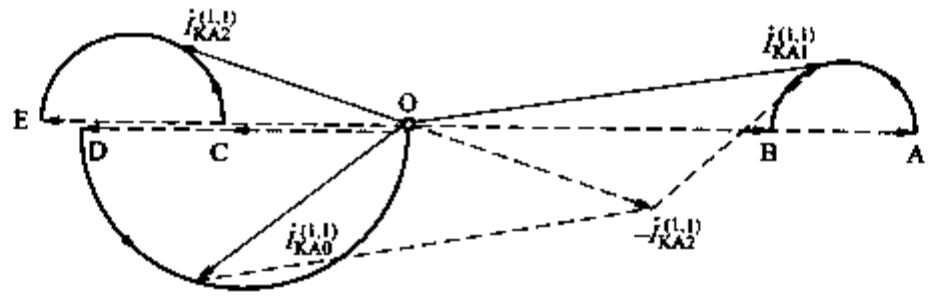


图 2－58 计及 R_g 后故障点序电流相量变化（$Z_{\Sigma 0} < Z_{\Sigma 1}$）

计及 $Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma 2}$，改写式（2－167b）为

$$\dot{I}_{KA2}^{(1,1)} = \frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} \cdot \dot{I}_{KA1}^{(1,1)} = -\frac{\dot{U}_{KA[0]}}{2Z_{\Sigma 1} + \dfrac{Z_{\Sigma 1}^2}{Z_{\Sigma 0}}} \tag{2-178}$$

由式（2－89）、式（2－87）得到

$$\dot{I}_{KA2}^{(2)} = -\dot{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{\dot{U}_{KA[0]}}{-2Z_{\Sigma 1}} \tag{2-179}$$

比较式（2－178）、式（2－179）得到 $|\dot{I}_{KA2}^{(2)}| > |\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$，反映在图 2－58 中，OE 代表 $|\dot{I}_{KA2}^{(2)}|$ 相量（OE > OC）；注意到 $R_g = \infty$ 即为两相相间短路，自然 $|\dot{I}_{KA0}^{(2)}| = 0$。

当 $R_g = 0 \sim \infty$ 变化时，$|\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}|$、$|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$、$|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|$ 相量端点的变化轨迹如图 2－58 中圆弧所示。显而易见，计及 R_g 影响后，$|\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}|$、$|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$、$|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|$ 不在一条直线上了，而是 $|\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}|$ 超前 $|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|$，$|\dot{I}_{KA0}^{(1,1)}|$ 超前 $|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$，$|\dot{I}_{KA2}^{(1,1)}|$ 超前 $|\dot{I}_{KA1}^{(1,1)}|$，但仍保持 $\dot{I}_{KA1}^{(1,1)} + \dot{I}_{KA2}^{(1,1)} + \dot{I}_{KA0}^{(1,1)} = 0$ 的关系。

3. 对测量阻抗的影响

图 2－1 中 K 点 BC 相经 R_g 接地时，分析线路 M 侧的测量阻抗。

对 M 侧的 BC 相相间测量阻抗，因没有计及故障点电弧电阻，所以测量阻抗仍然与故障点到保护安装处的线路长度成正比，即 R_g 不影响相间阻抗继电器的测量阻抗。

对 M 侧 B 相、C 相的测量阻抗 Z_{mB}、Z_{mC}，按式（2－152）其值为

$$Z_{mB} = \frac{\dot{U}_{MB}}{\dot{I}_{MB} + K3\dot{I}_0} = Z_{MK1} + \Delta Z_B \tag{2-180a}$$

$$Z_{mC} = \frac{\dot{U}_{MC}}{\dot{I}_{MC} + K3\dot{I}_0} = Z_{MK1} + \Delta Z_C \tag{2-180b}$$

而

$$\Delta Z_B = \frac{\dot{I}_g}{\dot{I}_{MB} + K3\dot{I}_0} \cdot R_g \tag{2-180c}$$

$$\Delta Z_C = \frac{\dot{I}_g}{\dot{I}_{MC} + K3\dot{I}_0} \cdot R_g \tag{2-180d}$$

由于附加测量阻抗 ΔZ_B、ΔZ_C 的存在，破坏了测量阻抗 Z_{mB}、Z_{mC} 与故障点到保护安装处线路阻抗的正比关系。

计及式（2－202），由图2－66容易写出零序电压表示式为

$$\dot{U}_{N0}=\dot{I}_{M0}Z_{N0}=-\frac{Z_{N0}}{Z_{00}}\cdot\Delta U_0$$

$$\dot{U}'_{M0}=\dot{I}_{M0}(Z_{N0}+Z_{MN0})=-\frac{Z_{N0}+Z_{MN0}}{Z_{00}}\cdot\Delta\dot{U}_0$$

$$\dot{U}_{M0}=-\dot{I}_{M0}Z_{M0}=\frac{Z_{M0}}{Z_{00}}\cdot\Delta\dot{U}_0$$

根据以上几式作出零序电压分布如图2－69所示。

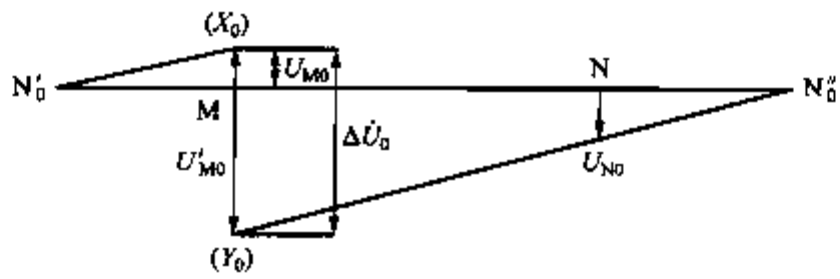


图2－69 一个断相口非全相运行时零序电压分布

负序电压分布与图2－69相似，只是N'_0、N''_0是X侧、Y侧的系统中性点，并非是X侧、Y侧的接地中性点。

（2）两个断相口非全相运行。两个断相口非全相运行时的零序网络如图2－67所示，计及式（2－203），由图2－67容易写出零序电压表示式为

$$\dot{U}_{N0}=\dot{I}_{M0}Z_{N0}=-\frac{Z_{N0}}{Z_{00}}\cdot\Delta U_0 \tag{2-206a}$$

$$\dot{U}'_{N0}=\frac{\Delta\dot{U}_0}{2}+\dot{I}_{M0}Z_{N0}=-\frac{Z_{N0}-\frac{Z_{00}}{2}}{Z_{00}}\cdot\Delta\dot{U}_0 \tag{2-206b}$$

$$\dot{U}'_{M0}=-\frac{\Delta\dot{U}_0}{2}-\dot{I}_{M0}Z_{M0}=-\frac{\frac{Z_{00}}{2}-Z_{M0}}{Z_{00}}\cdot\Delta\dot{U}_0 \tag{2-206c}$$

$$\dot{U}_{M0}=-\dot{I}_{M0}Z_{M0}=\frac{Z_{M0}}{Z_{00}}\cdot\Delta\dot{U}_0 \tag{2-206d}$$

作出不同Z_{M0}、Z_{N0}情况下零序电压分布如图2－70所示。由图可以看出，M、N母线上的零序电压不可能为零值（当$\Delta U_0\neq0$时），但线路侧的零序电压可能为零。如当$Z_{N0}=\frac{Z_{00}}{2}$时，则有$\dot{U}'_{N0}=0$（此时$\dot{U}'_{M0}\neq0$）；当$Z_{M0}=\frac{Z_{00}}{2}$时，有$\dot{U}'_{M0}=0$（$\dot{U}'_{N0}\neq0$）。当然$\dot{U}'_{M0}$、$\dot{U}'_{N0}$不可能同时为零值。

负序电压分布与图2－70相似。

（二）按给定负荷电流以分析

按给定发电机电动势分析纵向不对称故障，概念清晰，容易得到纵向不对称故障电气量的特点。但是，在复杂多电源网络中，要得到断相处两侧等值电动势间的相角差是十分困难的，并且断相后两侧等值电动势间的相角差还要发生变化。正因为如此，按给定电动势分析纵向不对称故障的方法，难以得到断相处的各序电流、断口处两点间电压以及断相处电流。

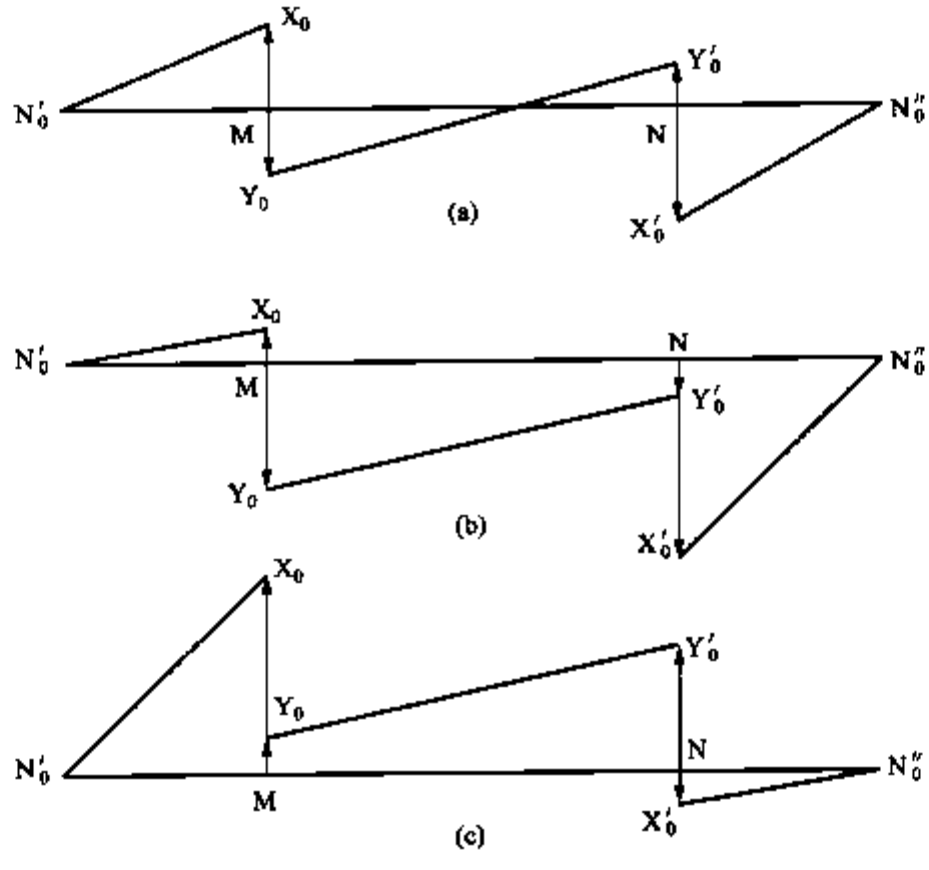


图 2－70　两个断相口非全相运行时零序电压分布

(a) $Z_{M0}<\frac{Z_{00}}{2}$、$Z_{N0}<\frac{Z_{00}}{2}$；(b) $Z_{M0}<\frac{Z_{00}}{2}$、$Z_{N0}>\frac{Z_{00}}{2}$；(c) $Z_{M0}>\frac{Z_{00}}{2}$、$Z_{N0}<\frac{Z_{00}}{2}$

按给定负荷电流分析纵向不对称故障，是不计断相后两侧等值电动势的大小及相位的变化，即假设 $\dot{I}_{loa\cdot A}=\frac{\Delta\dot{E}_A}{Z_{11}}=\frac{\dot{E}_{XA}-\dot{E}_{YA}}{Z_{11}}$断相前、后保持不变，从而容易求得断相后的有关电气量，适合多电源网络中非全相运行的分析计算。

1. 断相处各序电流、断口处两点间电压

设图 2－1 中的 MN 线路 M 侧 A 相断线，计及 $\dot{I}_{loa\cdot A}=\frac{\Delta\dot{E}_A}{Z_{11}}$，由式（2－193）得到断相处各序电流为

$$\dot{I}_{A1}^{(1,1)}=\frac{\frac{1}{Z_{22}}+\frac{1}{Z_{00}}}{\frac{1}{Z_{11}}+\frac{1}{Z_{22}}+\frac{1}{Z_{00}}}\cdot\dot{I}_{loa\cdot A} \tag{2-207a}$$

$$\dot{I}_{A2}^{(1,1)}=-\frac{\frac{1}{Z_{22}}}{\frac{1}{Z_{11}}+\frac{1}{Z_{22}}+\frac{1}{Z_{00}}}\cdot\dot{I}_{loa\cdot A} \tag{2-207b}$$

$$\dot{I}_{A0}^{(1,1)}=-\frac{\frac{1}{Z_{00}}}{\frac{1}{Z_{11}}+\frac{1}{Z_{22}}+\frac{1}{Z_{00}}}\cdot\dot{I}_{loa\cdot A} \tag{2-207c}$$

十分明显，只要知道断相前该线路的负荷电流大小，就很容易计算出单相断线后的各序电流了。网络中其他各支路的各序电流通过序电流分布系数可方便求出。

应当指出，式（2－207a）中的正序电流包含负荷电流，因此由 A 相断线产生的正序电

$$\dot{U}_{A2}=(\dot{U}_{a2}+j\dot{I}_{a2}X_{T2})e^{j30°} \tag{2-228}$$

式中：X_{T2}为变压器负序电抗标幺值，有 $X_{T2}=X_{T1}$。当 YN 侧短路故障时，类似式（2-226），关系式为

$$\dot{U}_{a2}=(\dot{U}_{A2}+j\dot{I}_{A2}X_{T2})e^{-j30°} \tag{2-229}$$

根据上述正、负、零序分量传变规律，在不对称短路时，分析变压器两侧电流分布及其电压、电流的相量关系的具体方法是：

1）先求出短路故障处的各序分量电压、电流，并根据短路故障类型、短路相别求出相互间关系，而后作出短路侧的电压、电流相量图。

2）根据变压器的接线组别，确定变压器另一侧（非短路侧）的各序分量电压、电流的表示式。

3）应用计算公式或相量图，将变换后的各序分量电压、电流进行叠加，最后求得变压器另一侧的各相电压和电流。

4）对于变压器两侧电流的分布，各相电流应以故障相的电流表示，以便进行各相电流大小的比较。在画电压、电流相量关系时，认为电路参数是纯电感，不计电阻；对于变压器内部电抗上的压降，在通过的电流较小时，为简单明了，可以不考虑，而当通过的电流较大特别是通过短路电流时，应计及其影响。

二、YN，d11 接线变压器 d 侧 ab 相短路

图 2-74 所示为 YN，d11 接线变压器在 d 侧 ab 相短路，短路点边界条件为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{c0}&=0\\ \dot{I}_{c1}+\dot{I}_{c2}&=0\end{aligned}\right\} \tag{2-230}$$

$$\dot{U}_{c1}=\dot{U}_{c2} \tag{2-231}$$

以 c 相为特殊相，d 侧各相的电流为

$$\dot{I}_a=a^2\dot{I}_{c1}+a\dot{I}_{c2}=-j\sqrt{3}\dot{I}_{c1}=\dot{I}_K^{(2)}$$

$$\dot{I}_b=a\dot{I}_{c1}+a^2\dot{I}_{c2}=j\sqrt{3}\dot{I}_{c1}=-\dot{I}_K^{(2)}$$

$$\dot{I}_c=\dot{I}_{c1}+\dot{I}_{c2}=0$$

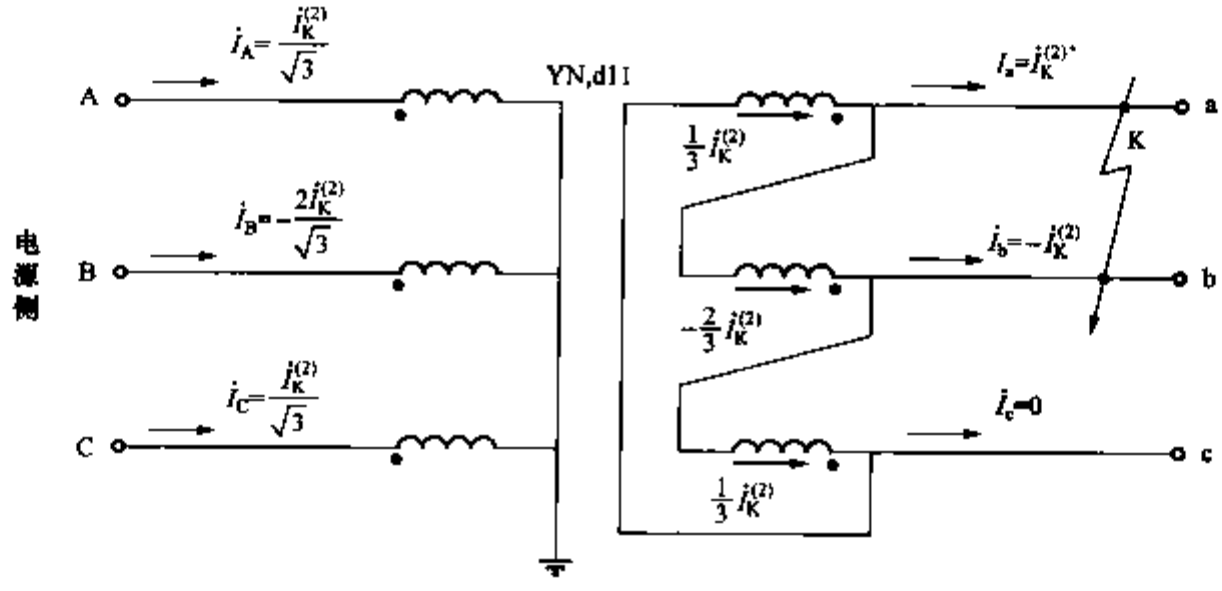


图 2-74 YN，d11 接线变压器在 d 侧 ab 相短路及其电流分布

YN 侧电流可表示如下

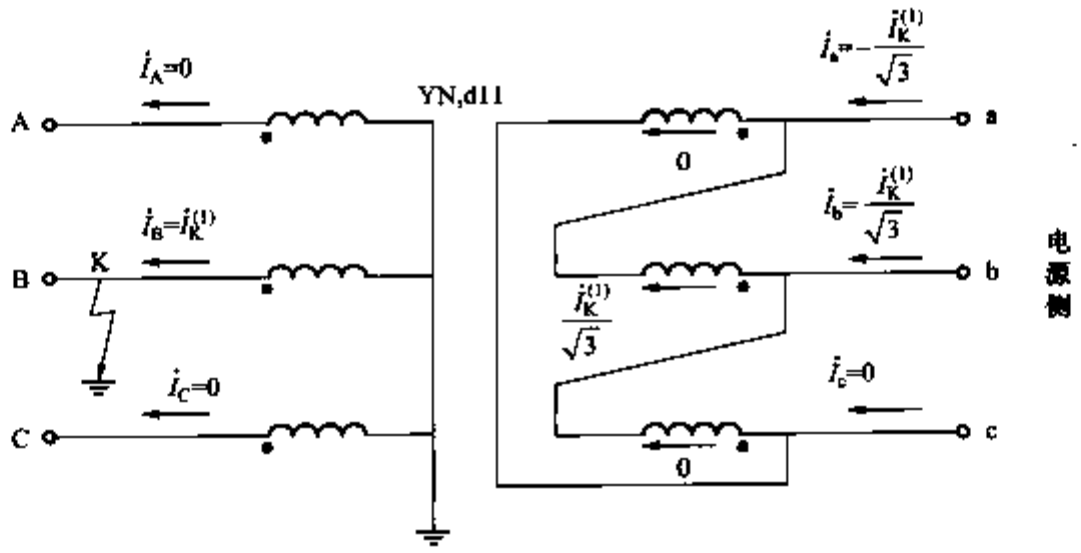


图2－76 YN，d11接线变压器在YN侧B相接地短路及其电流分布

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{C1}e^{j30°} + \dot{I}_{C2}e^{-j30°} = (a^2e^{j30°} + ae^{-j30°})\frac{\dot{I}_K^{(2)}}{\sqrt{3}} = 0 \qquad (2-235c)$$

YN侧、d侧电流相量关系如图2－77所示，电流分布如图2－76所示。

YN侧B相接地时，与电流分布相同，在d侧绕组引出线上无零序分量电压，仅有正序、负序分量电压。YN侧、d侧三相电压为

$$\dot{U}_A = a\dot{U}_{B1} + a^2\dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0}$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0} = 0$$

$$\dot{U}_C = a^2\dot{U}_{B1} + a\dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= a(\dot{U}_{B1} + j\dot{I}_{B1}X_{T1})e^{j30°} + a^2(\dot{U}_{B2} + j\dot{I}_{B2}X_{T2})e^{-j30°} \\ &= \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} - j\frac{\dot{I}_K^{(1)}}{\sqrt{3}}X_{T1}\end{aligned} \qquad (2-236a)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_b &= (\dot{U}_{B1} + j\dot{I}_{B1}X_{T1})e^{j30°} + (\dot{U}_{B2} + j\dot{I}_{B2}X_{T2})e^{-j30°} \\ &= \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2} + j\frac{\dot{I}_K^{(1)}}{\sqrt{3}}X_{T1}\end{aligned} \qquad (2-236b)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_c &= a^2(\dot{U}_{B1} + j\dot{I}_{B1}X_{T1})e^{j30°} + a(\dot{U}_{B2} + j\dot{I}_{B2}X_{T2})e^{-j30°} \\ &= \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{c2}\end{aligned} \qquad (2-236c)$$

式中 $\dot{U}_{a1}$、$\dot{U}_{b1}$、$\dot{U}_{c1}$——变压器空载情况下，d侧的相应于YN侧的$\dot{U}_{A1}$、$\dot{U}_{B1}$、$\dot{U}_{C1}$的正序分量电压；

$\dot{U}_{a2}$、$\dot{U}_{b2}$、$\dot{U}_{c2}$——变压器空载情况下，d侧的相应于YN侧的$\dot{U}_{A2}$、$\dot{U}_{B2}$、$\dot{U}_{C2}$的负序分量电压。

YN侧、d侧的电压相量关系如图2－77所示。

由图2－76、图2－77可以看出，d侧各相电流的分布与YN侧接地短路相别有关，对应于故障相的滞后相电流为零（B相接地短路，d侧滞后相为c相），其余两相电流相等、方向相反，数值等于故障相电流的$\frac{1}{\sqrt{3}}$倍，d侧电流为零的一相电压最高，其余两相电压相等，相间电压一般较高。

步运行稳定性，即过渡到新的或恢复到原来的稳定运行状态。暂态稳定定义为要求在事件后的第一个或第二个摆动周期内，受影响发电机组（或部分系统）不对系统其余部分失去同步。

设在正常运行时，图 2－80 中发电机（隐极机）向无穷大系统送出有功功率 P_0，此时的功率角为 δ_0。当高压母线出口处 K 点发生短路故障时，发电机与系统间的联系阻抗为

$$X^{(1)}=X_{d\Sigma}+\frac{X_L(X_d+X_T)}{X_{\Sigma 2}+X_{\Sigma 0}} \qquad \text{（单相接地）}$$

$$X^{(2)}=X_{d\Sigma}+\frac{X_L(X_d+X_T)}{X_{\Sigma 2}} \qquad \text{（两相短路）}$$

$$X^{(1,1)}=X_{d\Sigma}+\frac{X_L(X_d+X_T)}{X_{\Sigma 2}/\!/X_{\Sigma 0}} \qquad \text{（两相短路接地）}$$

$$X^{(3)}=X_{d\Sigma}+\frac{X_L(X_d+X_T)}{0}=\infty \qquad \text{（三相短路）}$$

其中 $X_{\Sigma 2}$、$X_{\Sigma 0}$是故障点系统的综合负序、零序电抗，针对图 2－80 系统有

$$X_{\Sigma 2}=X_L/\!/(X_2+X_T)=\frac{X_L(X_2+X_T)}{X_2+X_T+X_L}$$

$$X_{\Sigma 0}=X_{L0}/\!/X_T=\frac{X_{L0}X_T}{X_{L0}+X_L}$$

式中 X_2、X_{L0}是发电机负序电抗和线路零序电抗。显然 $X_{d\Sigma}<X^{(1)}<X^{(2)}<X^{(1,1)}<X^{(3)}$。若发电机无 AER，则 K 点短路故障时的功角特性分别为

$$P^{(1)}=\frac{E_qU_S}{X^{(1)}}\sin\delta \qquad \text{（单相接地）}$$

$$P^{(2)}=\frac{E_qU_S}{X^{(2)}}\sin\delta \qquad \text{（两相短路）}$$

$$P^{(1,1)}=\frac{E_qU_S}{X^{(1,1)}}\sin\delta \qquad \text{（两相短路接地）}$$

$$P^{(3)}=0 \qquad \text{（三相短路）}$$

不同短路故障时的功角特性如图 2－81 所示。

当 K 点发生的是两相短路接地时，$P^{(1,1)}$降低，发电机输出功率降低，而发电机组输入的机械功率来不及变化，于是发电机转子加速，发电机电动势与 $\dot{U}_S$ 间的夹角不断增大，发电机输出功率的变化为 $a\to1\to2$；到故障切除时，功率角已增到 δ_2，送电恢复，但此时的送电功率大于机械输入功率 P_0，于是转子开始减速；到 δ_5 时，面积 B 正好等于面积 A，面积 A 代表了发电机转轴系统获得的加速能量，面积 B 则表示了制动能量，因而到 δ_5 时发电机组转速恢复到额定转速 ω_0，但对应 δ_5 时的 P 值仍然大于 P_0，发电机组转子继续制动减速，δ 角回摆。若故障切除时间增大，则 δ_2 与 δ_5 将随之增大，至 δ_5 到达 $180°-\delta_0$ 时是暂态稳定的极限情况，对应于此时的 δ_2 角为临界切除角。如果切除时间延迟，δ_5 角跨过 $180°-\delta_0$ 角后，发电机组在没有得到恢复平衡所需要的足够面积时，又滑入加速过程，于是 δ 角继续增大超过 180°，迅速对无穷大系统失去同步。

在图 2－81 中，同时画出了 $\Delta\omega=\omega-\omega_0$（$\omega_0$ 为同步角速度）的变化情况。故障前，$\Delta\omega=0$，短路后，发电机不断加速，到 δ_2 角时 $\Delta\omega$ 为正的最大值；故障切除后发电机减速，

$$\dot{U}_M = \dot{U}_{arc} + \dot{I} Z_{MK1} \tag{2-252}$$

式中：$\dot{I}$ 为 K 点三相短路时 M 母线流向故障点的电流；$\dot{U}_{arc}$ 为故障点电弧压降。

由式（2－252）作出相量关系如图 2－88 所示，由图得到

$$U_M \cos(\varphi + 90° - \varphi_{Line}) = OA < U_{arc}$$

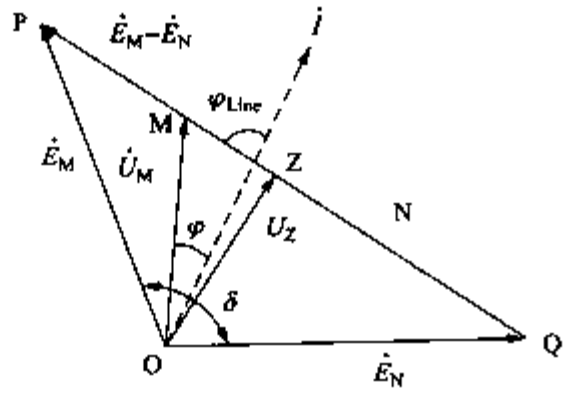


图 2－87 振荡过程中的电流、电压相量关系

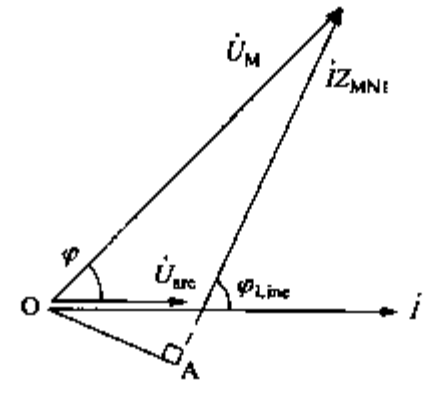


图 2－88 三相短路相量关系

计及 $U_{arc} < 5\% U_N$（U_N 为电网额定电压），上式改写为

$$U_M \cos(\varphi + 90° - \varphi_{Line}) < 5\% U_N \tag{2-253}$$

由上分析可见，若在 $\delta = 180°$ 附近设定一个 $U_M \cos(\varphi + 90° - \varphi_{Line})$ 区间（该区间包含 $5\% U_N$），在最长振荡周期（如取 3s）下 U_Z 在该区间内的变化时间为 t_X，则当测得的 $U_M \cos(\varphi + 90° - \varphi_{Line})$ 值在 $t_X + t_\Delta$（t_Δ 为时间裕度）内一直处在上述区间内，可判定线路上发生了三相短路故障；越出上述区间，可判定为系统振荡。

2. 电气量变化速度

系统振荡时保护安装处电压、电流随 δ 而周期变化；输电线路发生短路故障时，保护安装处的电压降低、电流增大是突变的。因此，就图 2－1 中 M 侧的测量阻抗 $Z_m = \frac{\dot{U}_M}{\dot{I}}$（二次值为 $\frac{n_{TA}}{n_{TV}} \cdot \frac{\dot{U}_M}{\dot{I}}$）来说，短路故障时 Z_m 由负荷阻抗突变为线路阻抗；系统振荡时 Z_m 是缓慢变化的，两者完全不同。

在图 2－89 中，设有两个四边形阻抗特性，Z_2 比 Z_1 大 25%，系统振荡时 Z_m 沿 mn 变化（当两侧等值电动势相等时，mn 变为直线），Z_2、Z_1 先后动作；短路故障时，Z_m 沿 OK 突变，Z_2、Z_1 同时动作。因此，Z_2 与 Z_1 动作时间差大于 Δt（Δt 可取 40～50ms）时，判系统振荡；动作时间差小于 Δt 时，判线路发生短路故障。

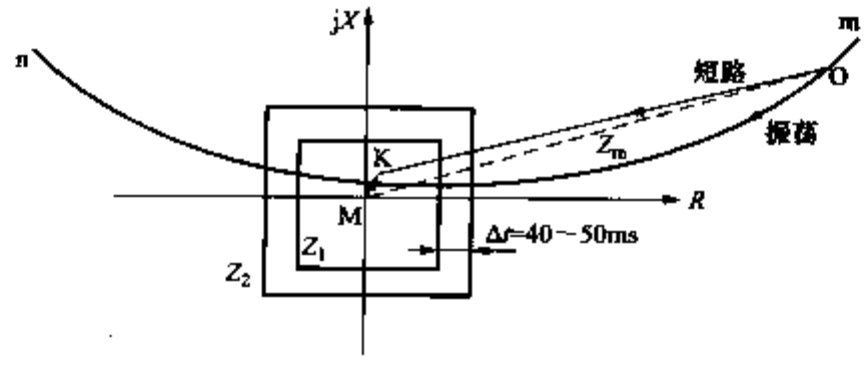


图 2－89 测量阻抗的变化

$$\left|\frac{\mathrm{d}Z_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}\right|_{\min}=\frac{\pi}{6}Z_{11}\ (\Omega/\mathrm{s}) \tag{2-255}$$

因此，当满足关系式

$$\left|\frac{\mathrm{d}Z_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}\right|>\frac{\pi}{6}Z_{11}\ (\Omega/\mathrm{s}) \tag{2-256}$$

判为系统振荡。当然，Z_{11}应取各种运行方式下的最大值。

4. $|\dot{I}_2|+|\dot{I}_0|$与$|\dot{I}_1|$的比较

分析图2-1中线路M侧的$|\dot{I}_2|+|\dot{I}_0|$与$|\dot{I}_1|$在系统振荡、振荡过程中发生不对称短路故障的大小关系。为便于比较，令

$$m=\frac{|\dot{I}_2|+|\dot{I}_0|}{|\dot{I}_1|} \tag{2-257}$$

所以只需分析在上述情况下的m值。

（1）系统振荡时。系统振荡时无负序电流、零序电流，仅有正序电流，故$m_{\mathrm{sw}}\approx 0$。

（2）振荡过程中发生不对称短路故障。由于振荡时δ在0°~360°间变化，所以分析两个极端情况$\delta=0°$、$\delta=180°$下的m值。

先分析$\delta=0°$情况下的不对称短路故障，图2-1中MN线路单相接地时，线路M侧的$\dot{I}_1=C_{1\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(1)}$、$\dot{I}_2=C_{2\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K2}}^{(1)}$、$\dot{I}_0=C_{0\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K0}}^{(1)}$，计及$C_{1\mathrm{M}}=C_{2\mathrm{M}}$、$\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(1)}=\dot{I}_{\mathrm{K2}}^{(1)}=\dot{I}_{\mathrm{K0}}^{(1)}$，得到$m$值为

$$m_{\delta=0°}^{(1)}=1+\frac{C_{0\mathrm{M}}}{C_{1\mathrm{M}}} \tag{2-258}$$

当图2-1中MN线路两相短路时，线路M侧的$\dot{I}_1=C_{1\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(2)}$、$\dot{I}_2=C_{2\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K2}}^{(2)}$、$\dot{I}_0=0$计及$C_{1\mathrm{M}}=C_{2\mathrm{M}}$、$\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(2)}=-\dot{I}_{\mathrm{K2}}^{(2)}$，得到$m$值为

$$m_{\delta=0°}^{(2)}=1 \tag{2-259}$$

当图2-1中MN线路两相接地短路时，线路M侧的

$$\dot{I}_1=C_{1\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(1,1)}、\dot{I}_2=C_{2\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K2}}^{(1,1)}=-C_{2\mathrm{M}}\cdot\frac{Z_{\Sigma 0}}{Z_{\Sigma 2}+Z_{\Sigma 0}}\cdot\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(1,1)}$$

$$\dot{I}_0=C_{0\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K0}}^{(1,1)}=-C_{0\mathrm{M}}\dot{I}_{\mathrm{K0}}^{(1,1)}=-C_{0\mathrm{M}}\cdot\frac{Z_{\Sigma 2}}{Z_{\Sigma 2}+Z_{\Sigma 0}}\cdot\dot{I}_{\mathrm{K1}}^{(1,1)}$$

计及$C_{1\mathrm{M}}=C_{2\mathrm{M}}$，得到$m$值为

$$m_{\delta=0°}^{(1,1)}=\frac{Z_{\Sigma 0}+\dfrac{C_{0\mathrm{M}}}{C_{1\mathrm{M}}}\cdot Z_{\Sigma 2}}{Z_{\Sigma 0}+Z_{\Sigma 2}} \tag{2-260}$$

当故障点靠近线路M侧时，$C_{0\mathrm{M}}$增大，有$C_{0\mathrm{M}}>C_{1\mathrm{M}}$，所以$m_{\delta=0°}^{(1,1)}>1$；当故障点靠近线路N侧时，$C_{0\mathrm{M}}$减小，这是最不利情况，出现$m_{\delta=0°}^{(1,1)}<1$的情况。但是，当N侧三相跳闸后，有$C_{0\mathrm{M}}=1$、$C_{1\mathrm{M}}=1$，于是$m_{\delta=0°}^{(1,1)}=1$。

由式（2-258）、式（2-259）和式（2-260）可见，在$\delta=0°$情况下线路发生不对称短路故障时，可认为$m_{\delta=0°}^{(n)}$值不会小于1。

再讨论$\delta=180°$情况下的不对称短路故障。由于此时故障前的负荷电流$\dot{I}_{\mathrm{loa}}=\dfrac{\dot{E}_{\mathrm{M}}-\dot{E}_{\mathrm{N}}}{Z_{11}}=$

$\frac{2\dot{E}_M}{Z_{11}}$有最大值，再计及不对称短路故障产生的正序电流 $C_{1M}\dot{I}_{K1}^{(n)}$，使 M 侧的正序电流有较大值，从而导致 $m_{\delta=180°}^{(n)}$值较小。分析表明，$m_{\delta=180°}^{(n)}<0.5$。但随着 δ 角偏离 180°向 360°趋近过程中，因 $\dot{I}_0$、$\dot{I}_2$ 增大，$\dot{I}_1$ 减小，所以 m 值也随着增大。

（3）不对称短路故障的判据。由上分析可见，根据具体的电力系统，选取合适的 m_{set}值（大于 0.5，如取 0.66），当 $m>m_{set}$或

$$|\dot{I}_2|+|\dot{I}_0|>m_{set}|\dot{I}_1| \tag{2-261}$$

成立时，就可判为振荡过程中发生了不对称短路故障。

应当指出，对于 $\delta=180°$情况下发生的不对称短路故障（含短路故障发生在振荡中心），因式（2－261）不满足，所以保护（指距离保护）不开放，这是十分必要的（因为此时阻抗继电器的保护区失去控制，可防止外部不对称短路故障的误动作）。δ 角偏 180°向 360°趋近过程中，m 值逐渐增大，当式（2－261）满足时，保护开放，此时阻抗继电器的保护区已恢复控制，可选择性切除不对称短路故障。可见，$\delta=180°$附近发生的不对称短路故障，保护动作带有小量延时。

5. 突变量电流

突变量电流指的是保护安装处的相电流突变量或相电流差突变量。

电力系统振荡时，由于频率偏离额定值，所以突变量电流元件有一定的不平衡输出，随着振荡电流的增大、频率偏离额定值程度的增大，不平衡输出相应增大。为不影响短路故障时突变量电流元件的灵敏度、克服不平衡输出的影响，在继电保护技术中广泛采用浮动门槛技术。如对相电流差突变量 $\Delta I_{\varphi\varphi}$元件，动作判据可描述为

$$\Delta I_{\varphi\varphi}(k)\geqslant 1.25\Delta I_{\varphi\varphi T}(k-N)+0.2I_N \tag{2-262}$$

式中 $\Delta I_{\varphi\varphi}(k)$——$t_k$ 时刻测得的相电流差突变量；

$\Delta I_{\varphi\varphi}(k-N)$——构成浮动门槛，$\Delta I_{\varphi\varphi T}(k-N)=\Delta I_{\varphi\varphi}(k-N)-\Delta I_{\varphi\varphi}(k-2N)$，其中 $\Delta I_{\varphi\varphi}(k-N)$、$\Delta I_{\varphi\varphi}(k-2N)$ 为 t_k-NT_S、t_k-2NT_S 测得的相电流差突变量，而 T_S 为采样间隔时间，N 为每工频周期采样的点数；

I_N——额定电流；

0.2、1.25——系数。

可以看出，短路故障时 $\Delta I_{\varphi\varphi}$元件灵敏动作，系统振荡时 $\Delta I_{\varphi\varphi}$元件不动作。

事实上，判别振荡和短路故障是采用 $\Delta I_{\varphi\varphi}$元件和相电流 I_φ元件（人为增加 10ms 延时）动作的先后来判别的。系统振荡时，I_φ元件先于 $\Delta I_{\varphi\varphi}$元件动作（实际上 $\Delta I_{\varphi\varphi}$元件并不动作）；短路故障时，$\Delta I_{\varphi\varphi}$元件先于 I_φ元件动作。当然，I_φ元件的动作电流应躲过该线路的最大负荷电流，并在线路末端短路故障时有足够的灵敏度。

应当指出，这种区分短路故障和振荡的原理不受短路故障类型、相别的影响，但这是建立在短路故障存在突变量电流这一基础上的。然而，在振荡过程中 $\delta=180°$时振荡中心处发生各种类型短路故障，因故障前该点电压为零，所以不存在故障分量电流，当然也没有突变量电流，即使 δ 角偏离 180°，也提取不到电流突变量。此时，式（2－261）处动作状态（不对称短路故障）、$U_M\cos(\varphi+90°-\varphi_{Line})$元件处动作状态（对称短路故障）和式（2－256）处不动作状态（对称短路故障），保护处开放状态。

根据图3－2（a）所示的正方向短路的零序序网图，按上述规定的电压、电流正方向可得：

$$\dot{U}_0 = -\dot{I}_0 Z_{S0} \tag{3-5}$$

根据图3－2（b）所示的反方向短路的零序序网图，按上述规定的电压、电流正方向可得：

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 (Z_{M0} + Z_{R0}) \tag{3-6}$$

如果系统中各元件零序阻抗的阻抗角都为80°。正方向短路时根据式（3－5），零序电压超前零序电流的角度为：

$$\varphi = \arg(\dot{U}_0/\dot{I}_0) = \arg(-Z_{S0}) = \arg Z_{S0} - 180° = -100° \tag{3-7}$$

反方向短路时根据式（3－6），零序电压超前零序电流的角度为：

$$\varphi = \arg(\dot{U}_0/\dot{I}_0) = \arg(Z_{M0} + Z_{R0}) = 80° \tag{3-8}$$

上述两式中的arg表示角度的意思。表达的是后面相量的幅角，是后面分子相量超前分母相量的角度。正方向短路和反方向短路时的相量图示于图3－2（c）、（d）中。式（3－7）、式（3－8）两式表明，在正、反方向接地短路时零序电压超前零序电流的角度都只与保护安装处与短路方向相反一侧零序阻抗的阻抗角有关。在正方向短路时，零序电压超前零序电流的角度是保护安装处反方向零序阻抗的阻抗角再反一个180°，角度是一个负角，零序电流超前于零序电压。在反方向短路时，零序电压超前零序电流的角度是保护安装处正方向零序阻抗的阻抗角，角度是正角，零序电流滞后于零序电压。正、反方向短路时零序电压超前于零序电流的角度截然相反，因此可用以区分正、反方向短路。式（3－7）和式（3－8）两式是构成零序方向继电器的基础。

2. 零序方向继电器的实现方法

根据上述分析，零序方向继电器的实现有如下两种方法：

（1）按零序电压、零序电流的相位比较方式实现。

测量零序电压和零序电流的夹角，满足下述动作方程继电器动作，反之继电器不动作。

$$-190° < \arg\frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < -10° \tag{3-9}$$

在模拟型保护中就是按相位比较方式构成继电器的，采用一个相位比较器或者用相敏比较电路实现相位比较。在微机保护中由于算法上的原因可用如式（3－10）所示的动作方程作相位比较：

$$90° < \arg\frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0 e^{j80°}} < 270° \tag{3-10}$$

仔细比较不难发现式（3－9）与式（3－10）是完全相同的。

正方向短路时，据式（3－7）零序电压超前零序电流－100°，按式（3－9），该角度满足动作方程且距两个边界最远，所以继电器最灵敏地动作。反方向短路时，据式（3－8）零序电压超前零序电流80°，按式（3－9），该角度不满足动作方程且距两个边界最远，所以继电器最可靠地不动作。在纵联零序方向保护中零序方向元件用正、反两个方向的方向元件。那么式（3－9）就是正方向方向元件的动作方程。而反方向方向元件的动作区是正方向方向元件的不动作区。

（2）按零序功率的幅值比较方式实现。

零序方向继电器也可以按零序功率的幅值比较方式实现。如果各相量都用极坐标表达，$3\dot{U}_0$ 的表达式是 $3\dot{U}_0=3U_0e^{j\varphi_u}$，式中 φ_u 是 $\dot{U}_0$ 的幅角。$3\dot{I}_0$ 的表达式是 $3\dot{I}_0=3I_0e^{j\varphi_i}$，式中 φ_i 是 $\dot{I}_0$ 的幅角。将 $3\dot{I}_0$ 电流往超前方向旋转一个 φ_l 角，得到 $3\dot{I}'_0$，$3\dot{I}'_0=3I_0e^{j\varphi_i}e^{j\varphi_l}=3I_0e^{j(\varphi_i+\varphi_l)}$。式中 φ_l 为系统零序阻抗的阻抗角，例如为 80°。设 $3\dot{I}'_0$ 电流的共轭值为 $3\hat{\dot{I}}'_0$，$3\hat{\dot{I}}'_0=3I_0e^{-j(\varphi_i+\varphi_l)}$。$3\dot{U}_0$ 电压与 $3\hat{\dot{I}}'_0$ 电流产生的功率 S_0 是它们的乘积：

$$\begin{aligned}S_0&=3\dot{U}_0\times3\hat{\dot{I}}_0=3U_0e^{j\varphi_u}\times3I_0e^{-j(\varphi_i+\varphi_l)}=3U_0\times3I_0e^{j(\varphi_u-\varphi_i-\varphi_l)}=3U_0\times3I_0e^{j(\varphi-\varphi_l)}\\&=3U_0\times3I_0[\cos(\varphi-\varphi_l)+j\sin(\varphi-\varphi_l)]=P_0+jQ_0\end{aligned}$$

式中：P_0、Q_0 分别为零序有功功率和零序无功功率。有功功率 P_0 是 $3\dot{U}_0$ 与 $3\hat{\dot{I}}'_0$ 乘积的实数部分：

$$P_0=\mathrm{Re}|3\dot{U}_0\times3\hat{\dot{I}}'_0|=3U_0\times3I_0\cos(\varphi-\varphi_l)\tag{3-11}$$

式中：φ 为 $3\dot{U}_0$ 超前于 $3\dot{I}_0$ 的夹角，$\varphi=\varphi_u-\varphi_i=\arg\dot{U}_0/\dot{I}_0$。当正方向短路时，据式(3-7)，$\varphi=-100°$，因此得 $P_0=-3U_0\times3I_0$，P_0 为负的最大值。故而正方向的零序方向继电器的动作方程可定为：

$$\begin{cases}P_0=3U_0\times3I_0\cos(\varphi-\varphi_l)<-1 & \text{当 } I_N=5\text{A 时}\\P_0=3U_0\times3I_0\cos(\varphi-\varphi_l)<-0.2 & \text{当 } I_N=1\text{A 时}\end{cases}\tag{3-12}$$

式中：I_N 为电流互感器二次侧的额定电流。在正方向短路时正方向的零序方向继电器可以灵敏动作。当反方向短路时据式（3-8），$\varphi=80°$，因此得 $P_0=3U_0\times3I_0$，P_0 为正的最大值。故而反方向的零序方向继电器的动作方程定为：

$$P_0=3U_0\times3I_0\cos(\varphi-\varphi_l)>0\tag{3-13}$$

在反方向短路时，反方向的零序方向继电器可以灵敏动作。反方向的零序方向继电器的动作边界为0VA，而正方向的零序方向继电器的动作边界定为-1VA（当电流互感器二次额定电流是5A时），这是为了让反方向方向元件的灵敏度高于正方向的方向元件灵敏度。

在零序电流方向保护中使用的零序方向继电器无正、反方向两个方向继电器。只需要正方向的零序方向继电器。

（三）零序方向继电器的性能评述

（1）正方向短路和反方向短路时零序电压和零序电流的夹角截然相反，动作边界十分清晰，因此性能良好，有良好的方向性。

（2）继电器的动作行为与负荷电流无关，与过渡电阻大小无关。

负荷电流是正序电流，因此负荷电流的大小不会影响零序方向继电器的动作行为。此外，由式（3-7）和式（3-8）两式可知继电器测得的零序电压超前零序电流的角度只与保护安装处与短路方向相反一侧的零序阻抗的阻抗角有关。而与短路方向相反的一侧的阻抗中是没有过渡电阻的，所以零序方向继电器不受过渡电阻的影响。由于上述原因零序方向继电器的动作行为不是最灵敏地动作就是最可靠地不动作。

（3）系统振荡时不会误动。

系统振荡时没有零序分量，因此零序方向继电器不会误动。另外零序方向继电器还要和零序电流继电器构成逻辑“与”的关系，振荡时零序电流继电器也不动作，所以更加不会

间的互感阻抗；

$\dot{U}_{K\varphi}$——短路点的该相电压；

$(\dot{I}_{\varphi}+K3\dot{I}_0)Z_1$——输电线路上，该相从短路点到保护安装处的电压降。

保护安装处的相间电压可以认为是保护安装处的两个相电压之差。考虑到如式(3－16)所示的相电压的计算公式后，保护安装处相间电压的计算公式为：

$$\dot{U}_{\varphi\varphi}=\dot{U}_{K\varphi\varphi}+\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_1 \tag{3-17}$$

式中：φφ 表示两相相间，φφ＝AB、BC、CA；$\dot{U}_{K\varphi\varphi}$为短路点的相间电压；$\dot{I}_{\varphi\varphi}$为两相电流差；$\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_1$ 为输电线路上从短路点到保护安装处的两相压降之差。两相上的 $K3\dot{I}_0Z_1$ 项相抵消。

式（3－16）和式（3－17）是短路时保护安装处电压计算的一般公式。由于阻抗继电器要用到这些电压，所以这两个公式十分重要。这里再重申几个重要概念以引起读者重视。

（1）输电线路某相上的压降是该相的相电流加上 $K3\dot{I}_0$ 以后的电流乘以该段线路的正序阻抗。只要该正序阻抗所在的线路上没有其他的分支电流（助增电流、外汲电流），例如线路内部没有短路故障（短路故障可以理解为在短路点有一个流出的分支电流——短路电流），也不管其他两相上是否发生了断线，也不管系统是否发生了振荡，这个结论总是正确的。把输电线路上的某相上的压降仅认为是该相相电流乘以线路的正序阻抗这个概念是错误的。只有在正常运行、系统振荡、两相短路、三相短路时由于零序电流是零，输电线路上的某相上的压降才是该相相电流乘以线路的正序阻抗。作为一般的计算公式，千万不要把 $K3\dot{I}_0Z_1$ 这一项漏掉。$K3\dot{I}_0Z_1$ 的物理概念是三相零序电流在输电线路的相间互感阻抗上的压降。

（2）式（3－16）和式（3－17）之所以称作短路时保护安装处电压计算的一般公式，是由于下述一些原因：

1）在任何短路故障类型下，对故障相或非故障相的相电压的计算、对故障相间或非故障相间电压的计算，这两个公式都是适用的。例如，当线路上 K 点发生 A 相单相接地短路时，保护安装处的 B 相电压为 $\dot{U}_B=\dot{U}_{KB}+(\dot{I}_B+K3\dot{I}_0)Z_1$。

2）在非全相运行时运行相上发生短路，计算保护安装处的运行相或两个运行相相间的电压，这两个公式也是适用的。例如在图 3－8 中，本线路 B、C 两相运行时 B 相又发生单相接地短路。保护安装处的 B 相电压为 $\dot{U}_B=\dot{U}_{KB}+(\dot{I}_B+K3\dot{I}_0)Z_1$。保护安装处的 B、C 相间电压为 $\dot{U}_{BC}=\dot{U}_{KBC}+(\dot{I}_B-\dot{I}_C)Z_1$。

3）在系统振荡过程中发生短路时计算保护安装处的电压，这两个公式也是适用的。例如在振荡中发生 A 相单相接地短路，保护安装处的 B 相电压为：$\dot{U}_B=\dot{U}_{KB}+(\dot{I}_B+K3\dot{I}_0)Z_1$。式中的 $\dot{I}_B$ 电流是此时（系统振荡加短路情况下）的 B 相电流，是系统纯振荡状态下的 B 相电流和短路附加状态下 B 相的电流之和。

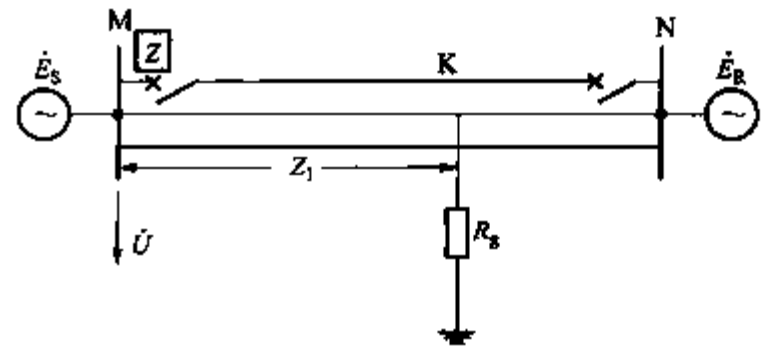


图 3－8 非全相运行中运行相发生短路

基于上述原因，所以这两个公式是一般的计算公式。

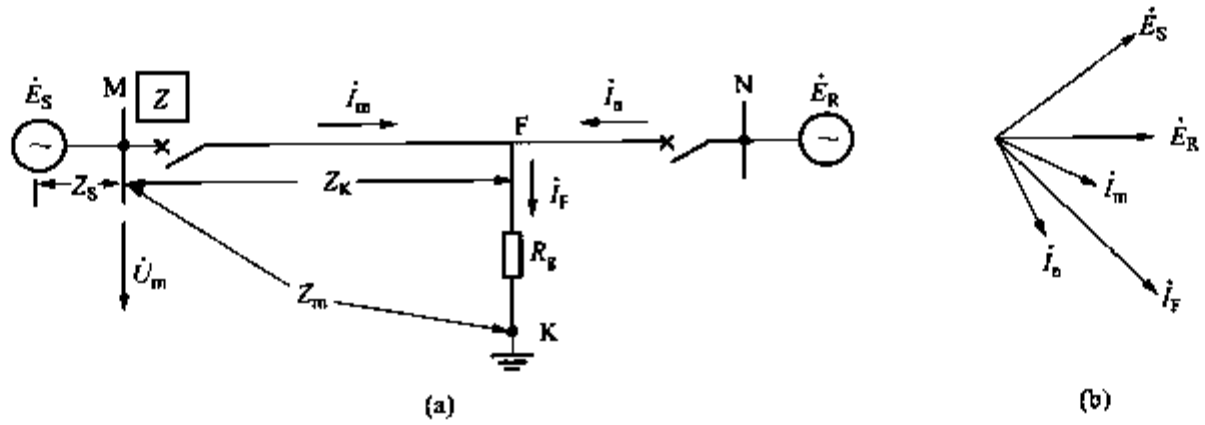


图 3－9 正向短路示意图

（a）系统图；（b）电流相量图

其中
$$Z_a = \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m} R_g = \left|\frac{I_F}{I_m}\right| e^{j\theta} R_g$$

$$\theta = \arg \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m}$$

$$\frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m} = \frac{1}{\dot{C}}$$

式中：$\dot{C}$ 为保护安装侧电流分配系数。

下面作几点讨论：

（1）装在 M 侧的阻抗继电器的测量阻抗是从保护安装处 M 往短路方向看过去一直看到过渡电阻 R_g 下方 K 点的阻抗。所以，从 M 点到 K 点的阻抗是 Z_m。如图 3－9（a）所示。其中过渡电阻 R_g 这一部分由阻抗继电器看过去是过渡电阻的附加阻抗 Z_a。过渡电阻的附加阻抗是由过渡电阻上的压降产生的。

（2）因为 $\dot{I}_F = \dot{I}_m + \dot{I}_n$，在一般的供电角下 $|\dot{I}_F| > |\dot{I}_m|$，故 $|Z_a| > R_g$。也就是由阻抗继电器看过去，过渡电阻产生的附加阻抗比过渡电阻本身大。这是由于对端电流 $\dot{I}_n$ 的助增作用造成的。在单侧电源系统中（没有 $\dot{E}_R$ 电源）因为 $\dot{I}_F = \dot{I}_m$，所以 $Z_a = R_g$。过渡电阻附加阻抗就是过渡电阻本身。

（3）由于 $\dot{I}_F$ 与 $\dot{I}_m$ 相位不一定相同，所以 Z_a 与 R_g 不一定同相位。设 $\dot{I}_F$ 超前 $\dot{I}_m$ 的角度为 θ。当 $\theta > 0°$时，过渡电阻的附加阻抗 Z_a 是阻感性的。当 $\theta < 0°$时，过渡电阻的附加阻抗 Z_a 是阻容性的。当 $\theta = 0°$时，过渡电阻的附加阻抗 Z_a 是纯阻性的。

（4）产生相位差 θ 的原因是短路点两端的电流 $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$ 可能有不同的相位。而造成 $\dot{I}_m$ 和 $\dot{I}_n$ 有不同相位的原因有两个：

1）短路点两侧电动势相位不同。两侧电动势相位差越大（也就是短路前负荷电流越大），θ 角越大。这是产生 θ 角的主要原因。

2）短路点两侧阻抗的阻抗角不同。一般发电机和变压器的阻抗角较大，输电线路的阻抗角略小些。但在 220kV 及以上的系统中，各电气设备的阻抗角大概都在 80°左右，它们的差别已不是很大了。所以该原因并不是主要原因。

（5）过渡电阻产生的附加阻抗对阻抗继电器工作的影响。

（8）导致 Z_a 有不同性质的原因除了有短路点两侧电流相位不同造成的因素外，还有由于两个故障相电流有不同相位造成的因素。这种情况仅发生在两相经过渡电阻接地短路时，对两个故障相的接地阻抗继电器工作的影响上。

在图 3－11（a）系统中 F 点发生 B、C 两相经过渡电阻 R_g 接地短路，忽略相间的电弧电阻。在 R_g 上的电流是 $\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}$。短路点 F 的 B 相和 C 相电压均为（$\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}$）$R_g$。流过保护的 B、C 相电流和零序电流分别为 $\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$ 和 $\dot{I}_0$。保护安装处 B、C 相电压为 $\dot{U}_B$ 和 $\dot{U}_C$。则保护安装处 B 相和 C 相两个接地阻抗继电器的测量阻抗分别为：

$$Z_{mB}=\frac{\dot{U}_B}{\dot{I}_B+K3\dot{I}_0}=\frac{(\dot{I}_B+K3\dot{I}_0)Z_K+(\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC})R_g}{\dot{I}_B+K3\dot{I}_0}=Z_K+\frac{\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}}{\dot{I}_B+K3\dot{I}_0}R_g=Z_K+Z_{aB} \tag{3-19}$$

$$Z_{mC}=\frac{\dot{U}_C}{\dot{I}_C+K3\dot{I}_0}=\frac{(\dot{I}_C+K3\dot{I}_0)Z_K+(\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC})R_g}{\dot{I}_C+K3\dot{I}_0}=Z_K+\frac{\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}}{\dot{I}_C+K3\dot{I}_0}R_g=Z_K+Z_{aC} \tag{3-20}$$

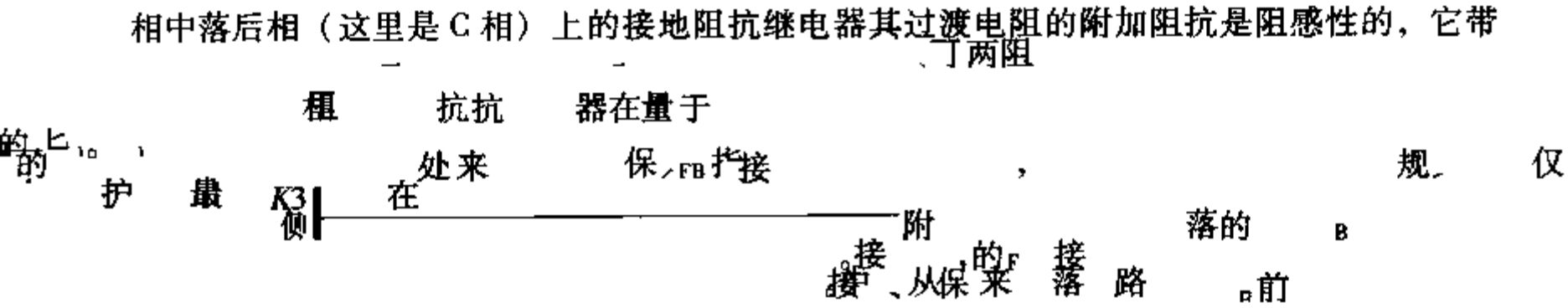
式中：Z_{aB}为 B 相阻抗继电器的过渡电阻附加阻抗；Z_{aC}为 C 相阻抗继电器的过渡电阻附加阻抗。

其中

$$Z_{aB}=\frac{\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}}{\dot{I}_B+K3\dot{I}_0}R_g$$

$$Z_{aC}=\frac{\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}}{\dot{I}_C+K3\dot{I}_0}R_g$$

由图 3－11（b）的相量图可见，（$\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}$）落后于（$\dot{I}_B+K3\dot{I}_0$），所以 Z_{aB}是阻容性的。而（$\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{FC}$）超前于（$\dot{I}_C+K3\dot{I}_0$），所以 Z_{aC}是阻感性的。因此，当发生两相经过渡电阻接地短路时，由于过渡电阻 R_g 中流的是两个故障相的电流之和，所以接在两故障相中超前相（这里是 B 相）上的接地阻抗继电器其过渡电阻的附加阻抗是阻容性的，它带来的问题是区外短路可能引起超越；而正方向近处短路可能引起拒动，正向出口短路有死区。接在两故障相中落后相（这里是 C 相）上的接地阻抗继电器其过渡电阻的附加阻抗是阻感性的，它带



于工作电压是所有阻抗继电器都有的，不同动作特性的阻抗继电器其实质是由于采用了不同的极化电压。许多专家学者致力于阻抗继电器原理的研究与分析，实质上是研究阻抗继电器应该采用什么样的极化电压最好，而在式（3－27）表达的动作方程中采用的极化电压是 $\dot{U}_m$。（注：上述以及以下几节的论述是针对第Ⅰ类阻抗继电器而言的。对于第Ⅱ类阻抗继电器即多相补偿阻抗继电器，其相位比较动作方程中的两个电压是相互极化的，不在此列。）

五、阻抗继电器的动作方程和动作特性

（一）阻抗继电器的实现方法

在微机保护出现以前的模拟型保护时代，所有的阻抗继电器都有其动作方程，继电器是否动作就看是否满足动作方程。而一定的动作方程在阻抗复数平面上对应一定的动作特性。微机保护出现后，阻抗继电器的实现方法有两大类。一类也是按动作方程来实现的。另一类是在阻抗复数平面上先固定一个动作特性（例如多边形特性），短路后利用微机的计算功能（例如微分方程算法）求出继电器的测量电抗 X_m 和测量电阻 R_m，从而得到测量阻抗 Z_m，$Z_m = R_m + jX_m$。进而判断测量阻抗相量在阻抗复数平面上是否落在规定的动作特性内，以决定它是否动作。下面介绍按动作方程实现的阻抗继电器的动作方程和动作特性。

阻抗继电器的动作方程分两大类。一类是幅值比较动作方程，$|\dot{A}| > |\dot{B}|$。另一类是相位比较动作方程，$\Phi_1 < \arg(\dot{C}/\dot{D}) < \Phi_2$。式中 $\dot{A}$、$\dot{B}$、$\dot{C}$、$\dot{D}$ 是某些电气量的组合。无论哪一类动作方程，一定的动作方程在阻抗复数平面上都对应一定的动作特性（这里暂且不讨论多相补偿阻抗继电器）。需要指出：阻抗继电器本身是按动作方程实现的，它只认动作方程。在阻抗复数平面上对应的动作特性是人们根据动作方程分析出来的，这个动作特性可帮助我们分析阻抗继电器的动作行为，并可以就其动作特性对阻抗继电器的性能做出评述。

（二）阻抗继电器的动作方程及其动作特性

1. 动作方程一

设相位比较动作方程为：

$$90° < \arg\frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} < 270° \tag{3-28}$$

式中：Z_m、Z_{set}是继电器测量阻抗和整定阻抗。式（3－28）表达的动作方程在阻抗复数平面上对应的以测量阻抗 Z_m 为自变量的动作特性如图3－17所示，它是以（$+Z_{set}$）和坐标原点（0）两点连线为直径的圆。圆内是动作区。若测量阻抗 Z_m 落在直径左边的圆周上时，从动作特性上看，继电器处在动作边界。从动作方程来看，（$Z_m - Z_{set}$）相量恰好超前 Z_m 相量的角度为90°，式（3－28）也恰好处于动作边界。若测量阻抗 Z_m 落在直径左边的半个圆内时，从动作特性看继电器应该动作，而（$Z_m - Z_{set}$）相量超前 Z_m 相量的角度大于90°小于180°，也满足式（3－28）的动作方程，继电器动作。所以直径左边的半个圆对应于式（3－28）左边的半个动作方程即 $90° < \arg\frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} < 180°$。同理可证明直径右边的半个圆正好对应于式（3－28）右边的半个动作方程即 $180° < \arg\frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} < 270°$。所以图3－17的整个圆与式（3－28）的整个动作方程相对应，自变量测量阻抗 Z_m 落在圆内时继电器动作。具有图3－17所示动作特性圆的阻抗继电器称作方向阻抗继电器（或称作姆欧继电器），因为反方向短路时测量阻抗在第Ⅲ象限，继电器是不动作的。整定阻抗 Z_{set}是该动作特性圆的

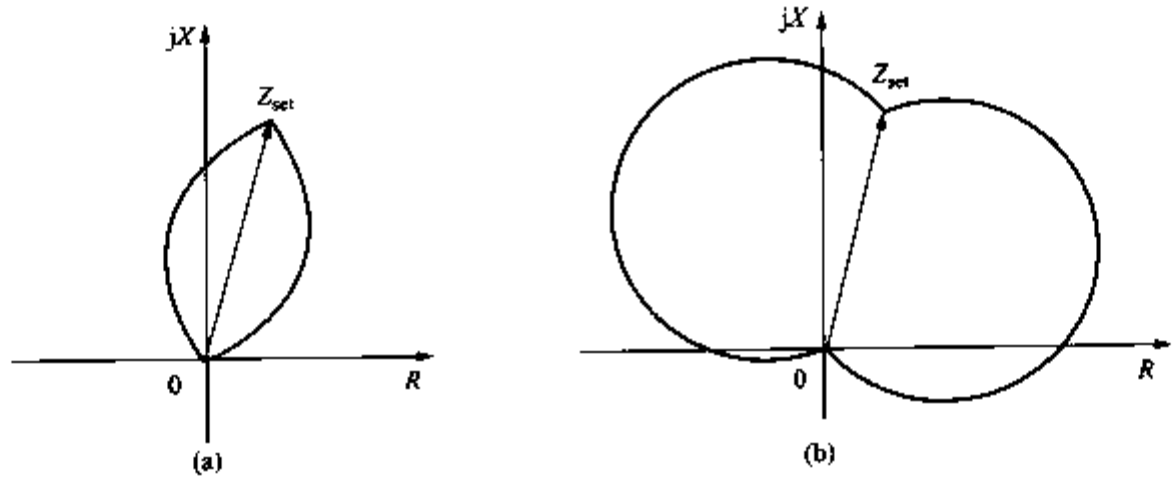


图 3－20　$90° + \theta < \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{Z_m} < 270° - \theta$ 的动作特性

（a）$\theta > 0°$；（b）$\theta < 0°$

特性的动作区的公共部分（交集），所以其实现的方法也可以用式（3－33）或式（3－34）表示的电压形式的动作方程中，θ 角分别取正、负两个值时构成的两个阻抗继电器的逻辑“与”来完成。同样，图 3－20（b）所示的苹果形特性的动作区是图 3－19 所示的圆 1 和圆 2 两个动作特性的动作区之和，所以其实现的方法也可以用式（3－33）或式（3－34）表示的电压形式的动作方程中，θ 角分别取正、负两个值构成的两个阻抗继电器的逻辑“或”来完成。

5. 动作方程五

设相位比较动作方程为：

$$180° < \arg \frac{Z_m - Z_{set}}{R} < 360° \tag{3-36}$$

当阻抗形式动作方程中被比较相位的两个电气量中的一个（分子或分母）与测量阻抗 Z_m 无关，是一个具有不变相位并提供相位比较基准的相量（通常是 R 或 X），此时该动作方程所对应的以测量阻抗 Z_m 为自变量的动作特性就既不是由圆也不是由圆弧构成的了。如果此时两个边界角相差 180°时，其动作特性是经过某端点的一条直线。当两个边界相差不是 180°时，其动作特性是相交于某端点的两条折线。而该端点由比较相位的两电气量中（分子或分母）与测量阻抗 Z_m 有关的一个电气量决定，决定的方法与前述相同。式(3－36)动作方程的两个边界相差 180°，且两个边界是 180°和 360°，该动作方程所对应的以测量阻抗 Z_m 为自变量的动作特性是经整定阻抗 Z_{set}端点（由分子决定）平行于 R 轴的一条直线，如图 3－21 所示。测量阻抗 Z_m 落在直线的下方继电器动作。如果测量阻抗 Z_m 落在 Z_{set}端点左边的线段上，从动作特性上看继电器处在动作边界，而此时 $Z_m - Z_{set}$相量超前于 R 轴 180°，按式（3－36），继电器也处于动作边界。如果测量阻抗 Z_m 落在 Z_{set}相量左边线段的下方，从动作特性上看继电器应动作，而此时 $Z_m - Z_{set}$相量超前于 R 轴的角度大于 180°，按式（3－36），继电器也动作。所以式（3－36）左边的半个动作方程对应于 Z_{set}相量左边的线段的下方区域。同理，式（3－36）右边的半个动作方程对应于 Z_{set}相量右边的线段的下方区域。式（3－36）整个动作方程对应于经 Z_{set}端点的整个一条直线的下方区域，如图中阴影区所示。从该动作特性可见，只要过渡电阻产生的附加阻抗是阻容性的或是纯电阻性的，它保护过渡电阻的能力是无穷大。即在区内短路，过渡电阻很大继电器都能动作。但是该继电器没有方向性，在反方向短路它将误动。这种动作特性称作电抗型特性，具有这种动

电器的测量阻抗 Z_m。反方向短路时，从保护安装处 M 母线到过渡电阻 R_g 的下面 K 点的阻抗是该阻抗继电器的测量阻抗的负值 $-Z_m$。

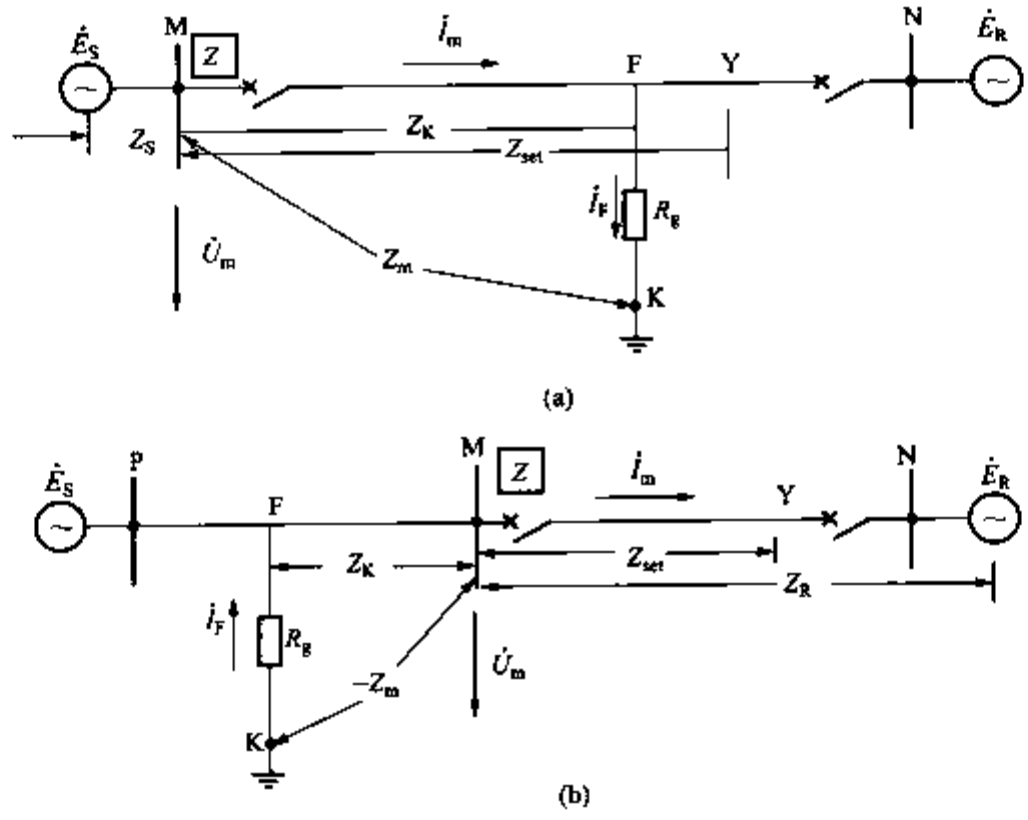


图 3－28　正方向、反方向短路的系统图

（a）正方向短路系统图；（b）反方向短路系统图

（一）相间阻抗继电器的动作特性分析和性能评述

相间阻抗继电器用来保护各种相间短路，它的工作电压、极化电压以及动作方程分别为：

工作电压
$$\dot{U}_{OP\varphi\varphi}=\dot{U}_{\varphi\varphi}-\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_{set} \tag{3-49}$$

极化电压
$$\dot{U}_{P\varphi\varphi}=\dot{U}_{1\varphi\varphi} \tag{3-50}$$

动作方程
$$90^\circ<\arg\frac{U_{OP\varphi\varphi}}{U_{P\varphi\varphi}}<270^\circ \tag{3-51}$$

上列各式中 $\varphi\varphi$ 表示 AB、BC、CA。

1. 正向短路的动作特性分析及性能评述

（1）正向两相短路。

以 $K_{BC}^{(2)}$ 为例分析 BC 相间阻抗继电器。假设短路前空载，下面各式中的电流都是故障分量电流。用正方向短路系统图图 3－28（a）里的参数来表达工作电压和极化电压：

$$\begin{aligned}\dot{U}_{OPBC}&=\dot{U}_{BC}-(\dot{I}_B-\dot{I}_C)Z_{set}=(\dot{I}_B-\dot{I}_C)Z_m-(\dot{I}_B-\dot{I}_C)Z_{set}\\&=(\dot{I}_B-\dot{I}_C)(Z_m-Z_{set})=2\dot{I}_B(Z_m-Z_{set})\end{aligned} \tag{3-52}$$

从基本概念上讲，正向短路后保护安装处正序电压发生变化是由于正序的故障分量电流 $\dot{I}_1$ 在保护背后正序阻抗上的压降造成的。因此短路后保护安装处的正序电压是短路前（正常运行时）保护安装处的电压——正序电压的记忆值 $\dot{U}_{1.M}$ 与正序电压的变化量 $\Delta\dot{U}_1$ 之和。考虑到短路以前空载，短路前保护安装处的电压 $\dot{U}_{1.M}$ 等于保护背后电源电动势 $\dot{E}_S$。因此：

$$\begin{aligned}\dot{U}_{PBC}&=\dot{U}_{1BC}=\dot{U}_{1B}-\dot{U}_{1C}\\&=(\dot{U}_{1B.M}+\Delta\dot{U}_{1B})-(\dot{U}_{1C.M}+\Delta\dot{U}_{1C})\end{aligned}$$

如图 3－31 所示。该圆向第Ⅰ象限上抛，远离了坐标原点。

当反方向发生两相短路时，继电器的测量阻抗落在第Ⅲ象限。即使在反方向出口或母线发生短路，过渡电阻的附加阻抗是阻容性的话，测量阻抗进入第Ⅱ象限也进入不了圆内。所以在反向两相短路时该继电器有良好的方向性。

（2）反向三相短路。

三相短路时三相是对称的，三个相间阻抗继电器的动作行为是一样的。下面用反方向短路系统图图 3－28（b）里的参数来表达工作电压和极化电压。

$$\dot{U}_{OP\varphi\varphi}=\dot{U}_{\varphi\varphi}-\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_{set}=-\dot{I}_{\varphi\varphi}(-Z_m)-\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_{set}$$
$$=\dot{I}_{\varphi\varphi}(Z_m-Z_{set}) \tag{3-61}$$

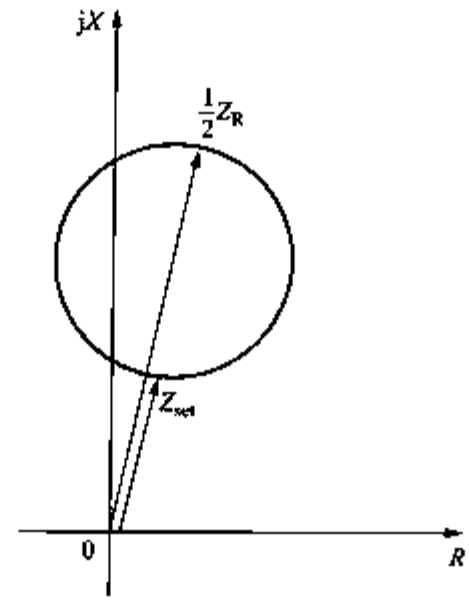


图 3－31 以正序电压作为极化电压，反向两相短路时相间阻抗继电器的动作特性

三相短路时只有正序分量，所以保护安装处的电压就是正序电压，因此极化电压为：

$$\dot{U}_{P\varphi\varphi}=\dot{U}_{1\varphi\varphi}=\dot{U}_{\varphi\varphi}=-\dot{I}_{\varphi\varphi}(-Z_m)=\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_m \tag{3-62}$$

将式（3－61）和式（3－62）代入动作方程式（3－51），并消去分子分母中的 $\dot{I}_{\varphi\varphi}$ 得：

$$90^\circ<\arg\frac{Z_m-Z_{set}}{Z_m}<270^\circ \tag{3-63}$$

该动作方程对应的动作特性是以（$+Z_{set}$）和坐标原点（0）两点连线为直径的圆。该特性与正向三相短路时的稳态动作特性一样，如图 3－30 所示。在反向出口或母线上发生三相短路时，尤其是安装在受电端的阻抗继电器在反向出口或母线上发生三相短路时，由于过渡电阻附加阻抗是阻容性的，继电器可能会误动，所以应采取措施防止这种误动。

（二）接地阻抗继电器的动作特性分析和性能评述

接地阻抗继电器用来保护各种接地短路，它的工作电压、极化电压以及动作方程分别为：

工作电压 $$\dot{U}_{OP\varphi}=\dot{U}_{\varphi}-(\dot{I}_{\varphi}+K3\dot{I}_0)Z_{set} \tag{3-64}$$

极化电压 $$\dot{U}_{P\varphi}=\dot{U}_{1\varphi} \tag{3-65}$$

动作方程 $$90^\circ<\arg\frac{\dot{U}_{OP\varphi}}{\dot{U}_{P\varphi}}<270^\circ \tag{3-66}$$

上列各式中，φ 表示 A、B、C。

1. 正向短路动作特性分析及性能评述

（1）正向单相接地短路。

以 $K_A^{(1)}$ 为例，分析 A 相接地阻抗继电器。假设短路前空载，下面各式中的电流都是故障分量电流。用正方向短路系统图图 3－28（a）里的参数来表达工作电压和极化电压：

$$\dot{U}_{OPA}=\dot{U}_A-(\dot{I}_A+K3\dot{I}_0)Z_{set}=(\dot{I}_A+K3\dot{I}_0)Z_m-(\dot{I}_A+K3\dot{I}_0)Z_{set}=(\dot{I}_A+K3\dot{I}_0)(Z_m-Z_{set}) \tag{3-67}$$

$$\dot{U}_{PA}=\dot{U}_{1A}=\dot{E}_{SA}-\dot{I}_{1A}Z_S=(\dot{I}_A+K3\dot{I}_0)(Z_S+Z_m)-\dot{I}_{1A}Z_S=(\dot{I}_A+K3\dot{I}_0)(Z_m+k'Z_S) \tag{3-68}$$

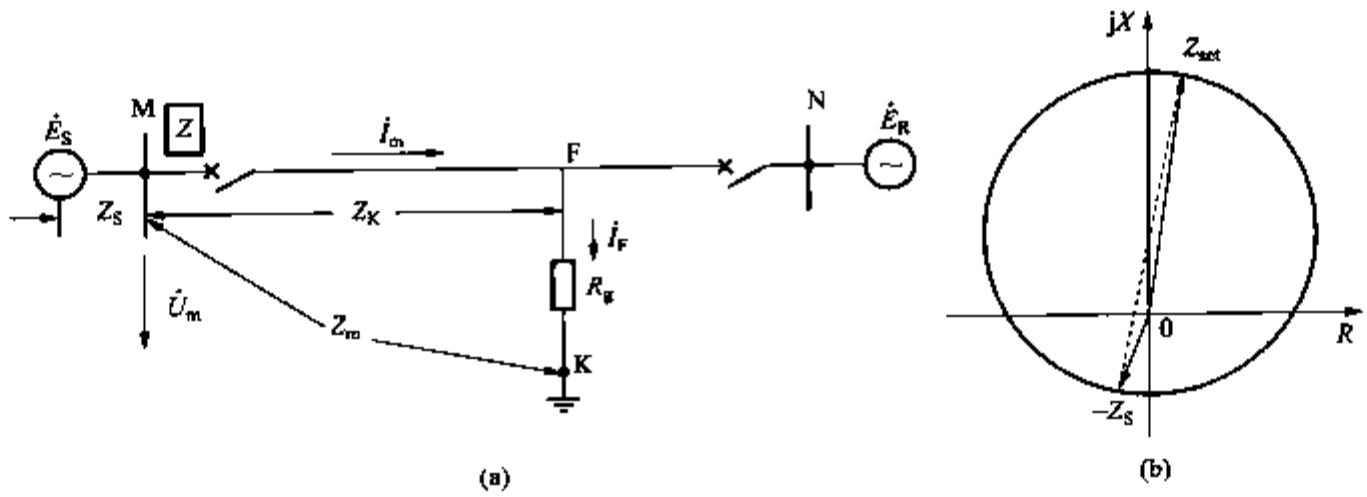


图 3－34 正方向短路的系统图和方向阻抗继电器的暂态动作特性

（a）系统图；（b）正向短路方向阻抗继电器的暂态动作特性

（二）反方向短路的暂态动作特性分析

在图 3－35（a）所示的系统图中，反方向 F 点发生经过渡电阻 R_g 的短路。阻抗继电器装在 MN 线路的 M 端，其正方向的所有阻抗为 Z_R。加在阻抗继电器上的电压 $\dot{U}_m$、电流 $\dot{I}_m$ 是阻抗继电器接线方式中的电压、电流，其正方向为传统规定的正方向。式（3－81）中的极化电压 $\dot{U}_{mM}$ 是正常运行时的 M 母线电压。设短路前空载，$\dot{E}_S=\dot{E}_R$，系统中各点电压都等于电动势。所以保护安装处短路前的电压也等于电动势，即 $\dot{U}_{mM}=\dot{E}_R$。将 $\dot{U}_{mM}$ 值代入动作方程式（3－81），并用图 3－35（a）系统图中的参数来表述式（3－81）中间部分的角度可得到：

$$\arg\frac{\dot{U}_m-\dot{I}_mZ_{set}}{\dot{U}_{mM}}=\arg\frac{\dot{U}_m-\dot{I}_mZ_{set}}{\dot{E}_R}=\arg\frac{-\dot{I}_m(-Z_m)-\dot{I}_mZ_{set}}{\dot{E}_R}$$

$$=\arg\frac{\dot{I}_m(Z_m-Z_{set})}{-\dot{I}_m(Z_R-Z_m)}=\arg\frac{Z_m-Z_{set}}{Z_m-Z_R} \tag{3-85}$$

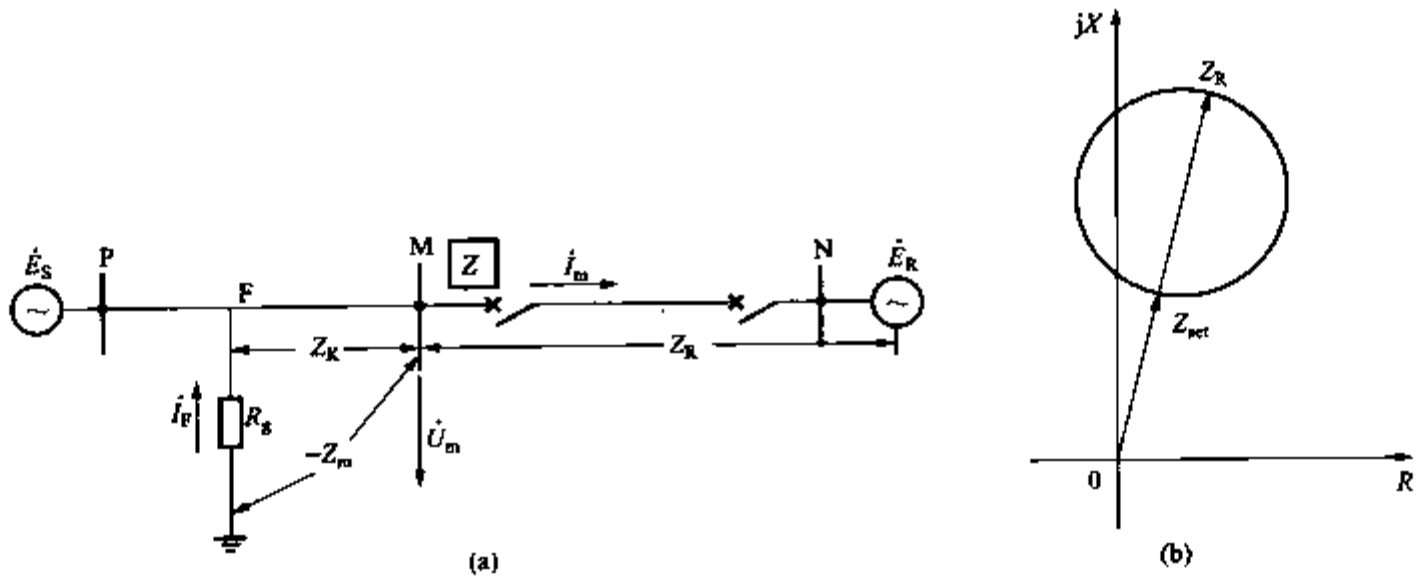


图 3－35 反方向短路的系统图和方向阻抗继电器的暂态动作特性

（a）系统图；（b）反向短路时方向阻抗继电器的暂态动作特性

将式（3－85）代入动作方程式（3－81）得到：

$$\begin{cases}\Delta\dot{U}=\dot{U}-\dot{U}_l\\ \Delta\dot{I}=\dot{I}-\dot{I}_l\end{cases}\tag{3-87}$$

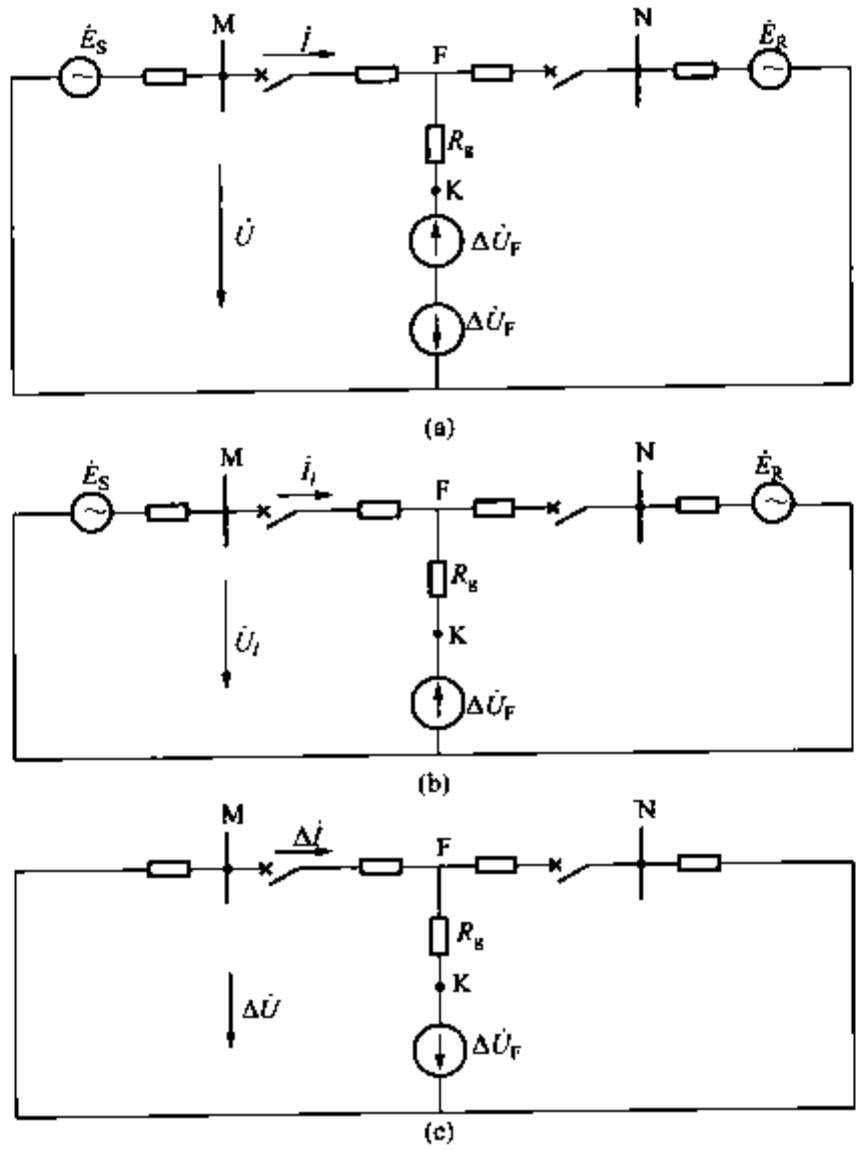


图 3－36 重叠原理示意图

（a）短路后状态；（b）正常负荷状态；（c）短路附加状态

式（3－87）中的 $\dot{U}$ 和 $\dot{I}$ 是短路后的电压、电流，是微机保护目前正在采样得到的数据。而 $\dot{U}_l$ 和 $\dot{I}_l$ 是短路前的电压、电流，是微机保护在以前历史上采样得到的数据。于是，微机保护将它们作个减法运算，就可得到短路附加状态里的电压和电流 $\Delta\dot{U}$、$\Delta\dot{I}$。它们反应的是电压和电流的变化量。用这个 $\Delta\dot{U}$ 和 $\Delta\dot{I}$ 构成的保护就是变化量的保护，这种反应变化量的保护也是一种暂态分量的保护。如果我们用滤波方法只取它们的工频量，那么这种保护就称作工频变化量的保护。所以工频变化量的保护就是用短路附加状态里的电气量构成的保护。在分析工频变化量的保护时，就应该用图 3－36（c）的短路附加状态来进行分析。

最后需要说明的是，在把当前采样得到的电气量减去历史上采样得到的电气量来获取工频变化量时，一定是要减去一个周波或两个周波前的相应时刻的电气量。也就是同一个电气角度下的两个电气量相减才是真正意义上的变化量。由于计算机的采样周期是有误差的，所以为了不带来更多的累计误差，一般只把当前的采样点的值减去 1～3 个周波以前的采样点的值来获取工频变化量。这样在短路稳态时得到的工频变化量就是零，只有在短路初瞬才能有工频变化量。所以工频变化量的保护只能用来构成快速的保护，无法用它来构成带时限的保护。

（二）工作原理与动作方程

工频变化量阻抗继电器的工作电压 $\Delta\dot{U}_{OP}$ 定义为：

增电流作用下继电器的测量阻抗加大了。在整定阻抗不变的情况下阻抗继电器测量阻抗的加大意味着保护范围的缩小，如果助增电流越大，保护范围缩小得越多。助增系数的大小与助增电源 E_P 和保护背后电源 E_S 的运行方式大小有关，所以它与系统的运行方式有关。由于距离保护第Ⅰ段只保护本线路的一部分，在本线路故障只要不是T接线路，从短路点到保护安装处之间不会再有其他分支，因此不会出现分支电流，所以距离保护第Ⅰ段在区内金属性短路时的测量阻抗固定的反应从短路点到保护安装处的线路阻抗，它不受运行方式变化的影响，这是距离保护第Ⅰ段的突出优点。但距离保护第Ⅱ、Ⅲ段由于保护范围伸到相邻线路上去了，在本线路末端的母线上可能存在分支电流，因此距离保护第Ⅱ、Ⅲ段的保护范围将受运行方式变化的影响，该影响主要体现在助增系数上。所以，在距离保护Ⅱ、Ⅲ段的整定计算中要考虑运行方式（助增系数）变化的影响。

在辐射状电网中计算助增系数不一定要先求出流过故障线路的电流 $\dot{I}_K$ 和流过保护的电流 $\dot{I}_m$，然后再求出它们的比值——助增系数 K_b，而可以用阻抗的关系直接求出。例如在图3－44（a）所示的辐射状电网中，助增系数为：

$$K_b=\frac{\dot{I}_K}{\dot{I}_m}=\frac{\dot{I}_K}{\dot{I}_K\dfrac{Z_P}{Z_P+Z_S+Z_l}}=1+\frac{Z_S+Z_l}{Z_P} \tag{3-107}$$

用阻抗值即可求出助增系数。式（3－107）还告诉我们一些有用的结论：

（1）在辐射状电网中，助增系数的大小与短路点在相邻线路上的位置（Z_K）无关。如果距离Ⅱ段的定值是按与相邻线路距离Ⅰ段定值相配合整定的话，理论上讲在计算此时的助增系数时短路点应选在相邻线路距离Ⅰ段保护范围的末端。但由于助增系数与短路点在相邻线路上的位置无关，所以短路点可选在相邻线路上的任意点，通常都选在相邻线路的末端。

（2）在整定距离Ⅱ、Ⅲ段定值时要将助增系数的影响考虑进去。为了在有助增电流时保护范围不要缩小得太多，保护的定值可以适当增大。但保护定值也不能增大得太多，应保证在助增电流最小时与相邻线路的保护仍有配合关系，所以在整定计算中应考虑最小的助增系数。为求得最小助增系数，其运行方式应考虑保护背后电源为最大运行方式（Z_S 最小），助增电源为最小运行方式（Z_P 最大）。此时助增电流 $\dot{I}_P$ 最小，助增系数最小。

（二）外汲电流的影响

如果阻抗继电器安装处的相邻线路是平行线路或者是环网，则在相邻线路上短路时，在短路点和保护安装处之间就有一个分支电流。例如图3－44（b）所示的就是相邻线路是平行线的情况。当短路点发生在平行线路的平衡点后面时，流过平行线路的另一条线路的分支电流是一个外汲电流 $\dot{I}_P$。由于外汲电流 $\dot{I}_P$ 的存在，流过故障线路上的电流 $\dot{I}_K$ 不再等于流过保护的电流 $\dot{I}_m$，并存在 $\dot{I}_m=\dot{I}_K+\dot{I}_P$ 关系式。在金属性短路时，保护安装处的电压等于MN线路上的压降和NK线路上的压降之和，即 $\dot{U}_m=\dot{I}_mZ_l+\dot{I}_KZ_K$，于是继电器的测量阻抗为：

$$Z_m=\frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}=\frac{\dot{I}_mZ_l+\dot{I}_KZ_K}{\dot{I}_m}=Z_l+\frac{\dot{I}_K}{\dot{I}_m}Z_K=Z_l+K_bZ_K \tag{3-108}$$

式中：K_b 为助增系数，$K_b=\dfrac{\dot{I}_K}{\dot{I}_m}=1-\dfrac{\dot{I}_P}{\dot{I}_m}$，在外汲电流的作用下助增系数 $K_b<1$。

这样，阻抗继电器的测量阻抗不再等于从短路点K到保护安装处的阻抗 Z_l+Z_K，在外

动态稳定是指电力系统受到小的或大的干扰后在安全稳定控制装置和自动调节装置的作用下保持长过程的运行稳定性的能力。

当电力系统发生振荡时，两侧电动势之间的夹角 δ 将在 0°～360°间不断变化。δ 在两个 180°间变化一周（总共 360°）所需要的时间称作振荡周期。工程中最长的振荡周期常按 1.5s 考虑。而对于两大系统间的振荡一般是低频振荡，振荡周期可能达到 3s 或更长一些，但这是一种特殊情况。火电机组对系统振荡时最短的振荡周期可以选择为不低于 0.15s。火电机组允许的最大转速不超过额定转速的 10%，当超过该值时危急保安器就会立即动作而跳闸停机，所以最短的振荡周期不会更低。而水轮发电机组由于调速系统不太灵敏，加之水锤效应的原因，其转速在全甩负荷时将可能达到额定转速的 140%，折合到频率关系为由 50Hz 升高到 70Hz。如果考虑到水轮发电机组还能提供一定的异步平均功率，转速的升高还到不了全甩负荷时的转速，因此最短的振荡周期大约为 0.1s。

当电力系统失去稳定造成振荡时，各点的电压和线路中的电流将随电动势夹角的变化作周期性的摆动，装在系统中的某些保护将不同程度的受到影响。下面主要分析对以正序电压为极化量的阻抗继电器工作的影响。

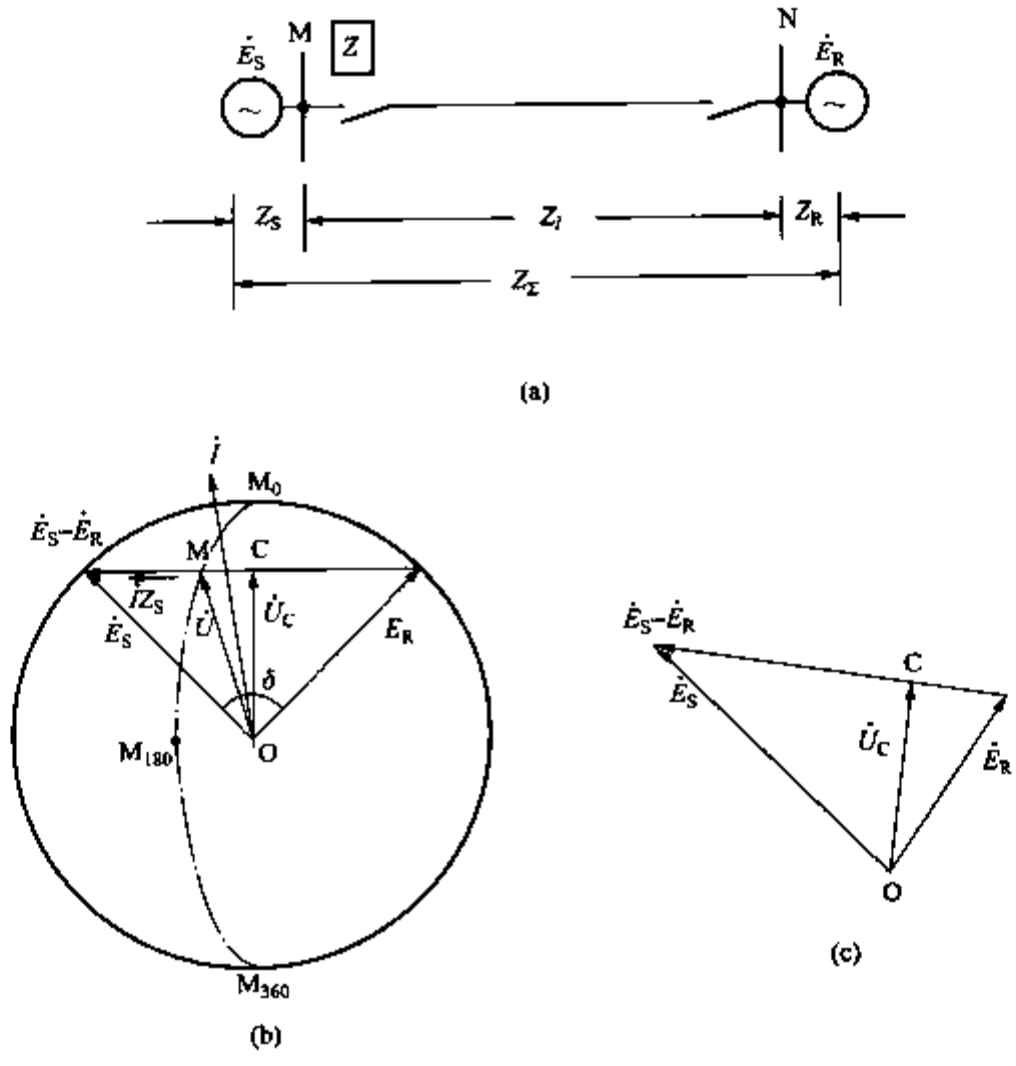


图 3－47 电力系统发生振荡时的系统图与相量图

（a）系统图；（b）$|E_S|=|E_R|$时相量图；（c）$|E_S|>|E_R|$时相量图

（一）系统振荡时电流、电压的变化

在图 3－47（a）所示的系统中保护安装在 MN 线路的 M 端。系统发生振荡前保护安装处是送电端，$\dot{E}_S$ 超前于 $\dot{E}_R$，$\dot{E}_R=\dot{E}_S e^{-j\delta}$。它们的夹角 δ（称作功角）由输送的有功功率 P 决定。$P=(\dot{E}_S\dot{E}_R/Z_\Sigma)\sin\delta$。假设两侧电动势的幅值相等 $|\dot{E}_S|=|\dot{E}_R|=|E|$，系统中各元件的阻抗角相同。由欧姆定理可知，在两侧电动势差 $\dot{E}_S-\dot{E}_R$ 的作用下将产生电流 $\dot{I}$。其

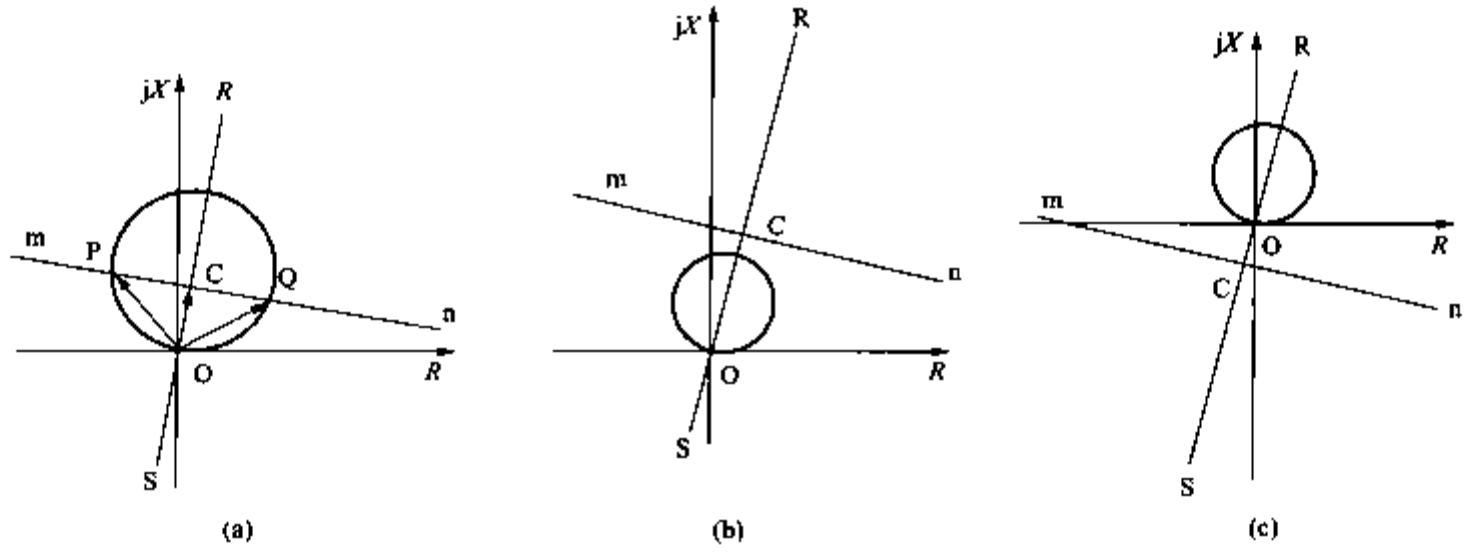


图 3－50 系统振荡时阻抗继电器动作行为的分析

（a）振荡中心位于阻抗继电器动作特性内；（b）振荡中心位于阻抗继电器动作特性外；

（c）振荡中心位于阻抗继电器的反方向，在动作特性外

每一个振荡周期中动作返还一次。其误动的时间为：

$$t=\frac{\delta_2-\delta_1}{360^\circ}T \tag{3-115}$$

式中：T 为振荡周期。

最后需要指出，对于工频变化量的阻抗继电器在系统发生振荡时是不会误动的。详情请见本节八中的分析。

下面来证明以正序电压为极化量的阻抗继电器在系统发生振荡时的动作特性是经过坐标原点的一个圆。

工作电压 $\dot{U}_{OP}=\dot{U}_m-\dot{I}_mZ_{set}=\dot{I}_m(Z_m-Z_{set})$

极化电压 $\dot{U}_P=\dot{U}_{1m}=\dot{U}_m=\dot{I}_mZ_m$

上两式中的 $\dot{U}_m$、$\dot{I}_m$ 为阻抗继电器的测量电压和测量电流。具体的相别由阻抗继电器的接线方式决定。在系统发生振荡时只有正序分量，所以极化电压是测量电压的正序分量也就是测量电压本身。将工作电压和极化电压代入动作方程式（3－51）或式（3－66），并经整理后得到：

$$90^\circ<\arg\frac{Z_m-Z_{set}}{Z_m}<270^\circ$$

该动作方程对应的动作特性是经过（$+Z_{set}$）和坐标原点两点连线为直径的圆。证毕。

（三）对振荡闭锁的要求

在系统发生振荡时阻抗继电器有可能误动，但是距离保护是不允许误动的。关于系统发生振荡时到底是否允许保护动作，我国和西方一些国家有着不同的观点。我们国家要求在系统发生振荡时应尽量保持系统的完整性，各地的保护不应该动作于跳闸（除预先设置的振荡解列点外）。因为在系统振荡时，若能由自动装置进行调节加之调度人员的一些操作，系统很快又能重新恢复同步稳定运行。我国运行经验证明，若能在振荡时快速减少送端系统侧的水电机组的出力，减少受端系统的负荷可以快速的平息系统振荡，是系统快速恢复同步运行的有效手段。若经过 3～4min 调整仍无效，再在某些预先设定的解列点解列。这样系统受到的影响最小对系统最为有利。我国电力系统长期的运行实践证明这种做法收到了良好的效

闭锁控制。此外最长的振荡周期按1.5s考虑时如果距离保护第Ⅰ段动作时间大于0.5s、距离保护第Ⅱ段动作时间大于1s，也可以不经振荡闭锁控制，靠延时躲过振荡的影响。

（2）对于正常运行时发生的第一次短路，振荡闭锁实行短时开放保护的方法。

在正常运行情况下发生短路时振荡闭锁应开放保护，允许距离保护去切除区内故障。但是如果振荡闭锁在短路后长期开放保护，那么假如系统由于区外短路后失去暂态稳定引起振荡的时候，距离保护又将会误动。所以在短路后振荡闭锁既要开放保护，但又不能长期开放。由于阻抗继电器在振荡时是在两侧电动势的夹角拉开得比较大时才会误动的。例如保护线路80%的距离保护第Ⅰ段，其阻抗继电器一般在两侧电动势的夹角大于120°~130°后才开始动作。而振荡时第一个振荡周期是较长的，据统计，实际记录到的在第一个振荡周期中两侧电动势的夹角到达180°前的前半个振荡周期最短的时间也有0.4s，而到达120°前的时间也在0.2s以上。所以由于短路引起系统振荡，并导致阻抗继电器在第一个振荡周期误动，发生在短路后的200ms以后。所以如果在200ms前振荡闭锁又重新将保护闭锁，就可以避免在随后的振荡中距离保护的误动。所以短时开放保护的时间不能大于200ms。但是，开放保护的时间也不能太短，应保证在距离保护第Ⅰ段范围内发生短路时距离保护第Ⅰ段能可靠切除故障。考虑到足够的裕度后，这时间应大于100ms。所以短时开放保护的时间应控制在120~200ms内，例如短时开放160ms。

（3）对于区外短路在上述短时开放保护时间（例如160ms）以后又紧接着发生区内短路、在振荡中又发生区内短路以及在非全相运行中运行相上又发生短路这三种情况下，振荡闭锁都应该开放保护，允许距离保护Ⅰ、Ⅱ段切除区内故障。

在正常运行时发生区外短路，振荡闭锁短时开放保护，例如开放160ms。在160ms期间由于是区外短路，阻抗继电器不动作。假如在160ms后又发生了Ⅰ、Ⅱ段的区内短路，如果振荡闭锁不能再次开放保护，距离保护Ⅰ、Ⅱ段将一直被闭锁，无法切除这种区内短路。只能靠长延时的第Ⅲ段切除短路。而第Ⅲ段的延时一般大于1.5s。这么长的延时，既不利于系统的稳定又可能造成相邻线路保护的越级跳闸。所以希望振荡闭锁在区外短路后又紧接着发生区内短路时，振荡闭锁能再次开放保护。

如果系统中先发生振荡，振荡闭锁是将保护闭锁的，以防止振荡时距离保护误动。但如果在振荡时又发生了短路，振荡闭锁也应该开放保护，允许距离保护Ⅰ、Ⅱ段切除区内的短路故障。否则同样只能靠动作时限大于1.5s的第Ⅲ段去切除故障。

在非全相运行期间，振荡闭锁是将距离保护闭锁的，以防止在非全相振荡时距离保护误动。这种非全相运行往往发生在单相重合闸或综合重合闸周期中。也就是单相短路，保护跳开单相断路器后，在重合闸之前线路处于非全相运行状态。这段时间大约在1s左右。在非全相运行期间如果运行相上又发生了短路，振荡闭锁应再次开放保护，以允许距离保护Ⅰ、Ⅱ段快速切除短路故障。

在模拟型距离保护装置中，例如在感应型、整流型和晶体管型的距离保护中，振荡闭锁只能保证系统发生振荡时闭锁距离保护，以及在正常运行中发生的第一次短路时振荡闭锁短时开放保护。过了短时开放的时间后，振荡闭锁就一直将保护闭锁，直至整组复归。这样区外故障过了短时开放时间后又紧接着发生区内故障时，以及振荡中再发生区内短路故障时振荡闭锁并不再次开放保护，依然将保护闭锁。在保护跳开单相进入非全相运行期间振荡闭锁就将保护闭锁，非全相运行中再发生短路振荡闭锁也不再次开放保护，也依然将保护闭锁。使距离保护在这几种情况下丧失了快速动作的Ⅰ、Ⅱ段保护。而只能依靠不受振荡闭锁控制

此判据可以在区外发生短路后又紧接着发生区内不对称短路和在振荡中发生不对称短路时用以开放保护，让距离保护Ⅰ、Ⅱ段快速切除区内短路。其开放保护的判据是：

$$|\dot{I}_2|+|\dot{I}_0|>m|\dot{I}_1| \tag{3-116}$$

式中，$m<1$。满足式（3－116）就立即开放距离保护。

在整流型和晶体管型距离保护的振荡闭锁中也曾用到过负序电流和零序电流。当出现负序、零序电流时短时开放保护。本判据虽然也是用负序和零序电流当作动作量，但引入了正序电流作为制动量。因为振荡时振荡电流是正序电流，所以用正序电流作为制动量，有利于系统在振荡中、在振荡中发生区外短路以及“先振荡后操作”时，本判据的振荡闭锁不开放保护。

当系统处于纯振荡期间，由于没有负序电流和零序电流，振荡电流又是正序电流是制动量。不能满足式（3－116）判据，故不开放距离保护。

在区外发生短路后又紧接着发生区内不对称短路和在振荡中发生不对称短路时都将出现负序电流。而在大接地电流系统中在上述情况下发生区内的接地短路时将出现零序电流。由本节八中阐述的重叠原理可知，图3－36（a）所示的短路后状态是同一图中（b）所示的短路前状态图（c）所示的短路附加状态的叠加。图中 ΔU_F 是短路点F在短路前的电压 $U_{F|0|}$。如果短路前系统是正常运行状态，则图（b）是正常负荷状态。$U_{F|0|}$ 基本上是额定电压，这时由图（c）求得的短路电流的故障分量值最大。在短路电流的实用计算中往往把 $U_{F|0|}$ 近似看作电动势 E，即认为短路前系统是空载状态。由短路电流计算的基本知识可知，在发生单相接地短路、两相短路和两相接地短路时，如果不考虑过渡电阻，流过故障支路的各序故障分量电流（或称作短路点的各序故障分量电流）分别如下列各式所示：

$$\dot{I}_{F1}^{(1)}=\dot{I}_{F2}^{(1)}=\dot{I}_{F0}^{(1)}=\frac{\dot{U}_{F|0|}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}}=\frac{\dot{U}_{F|0|}}{2Z_{1\Sigma}+Z_{0\Sigma}} \tag{3-117}$$

$$\begin{cases}\dot{I}_{F1}^{(2)}=-\dot{I}_{F2}^{(2)}=\dfrac{\dot{U}_{F|0|}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}}=\dfrac{\dot{U}_{F|0|}}{2Z_{1\Sigma}}\\ \dot{I}_{F_0}^{(2)}=0\end{cases} \tag{3-118}$$

$$\begin{cases}\dot{I}_{F1}^{(1.1)}=\dfrac{\dot{U}_{F|0|}}{Z_{1\Sigma}+\dfrac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}}}=\dfrac{\dot{U}_{F|0|}}{Z_{1\Sigma}Z_{2\Sigma}+Z_{1\Sigma}Z_{0\Sigma}+Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}\\ \dot{I}_{F2}^{(1.1)}=-\dot{I}_{F1}^{(1.1)}\dfrac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}}\\ \dot{I}_{F0}^{(1.1)}=-\dot{I}_{F1}^{(1.1)}\dfrac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}}\\ \dot{I}_{F1}^{(1.1)}=-[\dot{I}_{F2}^{(1.1)}+\dot{I}_{F0}^{(1.1)}]\end{cases} \tag{3-119}$$

上列各式中 $Z_{1\Sigma}$、$Z_{2\Sigma}$、$Z_{3\Sigma}$ 为对短路点F的正序、负序、零序综合阻抗。它等于短路点F两侧各序阻抗的并联值。

当经过过渡电阻发生短路时，在故障支路中串入了过渡电阻，上述各 $\dot{I}_{F1}$、$\dot{I}_{F2}$ 和 $\dot{I}_{F0}$ 的数值将减少。但单相接地短路时仍有 $\dot{I}_{F1}^{(1)}=\dot{I}_{F2}^{(1)}=\dot{I}_{F0}^{(1)}$ 关系；两相短路时仍有 $\dot{I}_{F1}^{(2)}=-\dot{I}_{F2}^{(2)}$ 关系；两相接地短路时虽然仍有 $\dot{I}_{F1}^{(1.1)}=-[\dot{I}_{F2}^{(1.1)}+\dot{I}_{F0}^{(1.1)}]$ 关系，但由于 $\dot{I}_{F2}^{(1.1)}$ 和 $\dot{I}_{F0}^{(1.1)}$ 相位

$$t=\frac{183.44°-170.82°}{360°}\times 1500=52.58\text{ms}$$

这说明系统振荡时，满足式（3－131）的时间仅为52.58ms。即使振荡周期按3s考虑，满足式（3－131）的时间也仅为105.16ms，小于150ms，所以不开放保护。

本判据就是利用$\dot{U}_{OS}$在电压阈值范围内的时间长短来区分振荡和短路的。

2）在500ms内一直满足下式开放保护：

$$-0.1U_N<\dot{U}_{OS}<0.25U_N \tag{3-132}$$

本判据的原理同上，只是作为上面1）判据的后备。

在三相短路时，如上所述$\dot{U}_{OS}$的值总是小于等于$0.05U_N$的。因此一直可以满足式（3－132）。过500ms延时即可开放保护。

在系统振荡期间，$\dot{U}_{OS}$的值等于振荡中心的电压$\dot{U}_C$。当振荡中心电压为$-0.1U_N$和$0.25U_N$值时，对应的δ角分别为191.48°和151.04°。如果最长的振荡周期按1.5s计算，那么振荡时，δ角度在191.48°到151.04°间停留的时间为：

$$t=\frac{191.48°-151.04°}{360°}\times 1500=168.5\text{ms}$$

这说明系统振荡时满足式（3－132）的时间仅为168.5ms，即使振荡周期按3s考虑，满足（3－132）的时间也仅为337ms，小于500ms，所以不开放保护。

式（3－131）和式（3－132）在保证纯振荡时不开放保护的同时又保证了在区外发生短路后又紧接着发生区内三相短路和在振荡中发生三相短路时可靠开放保护。分析表明，在振荡中发生三相经过渡电阻短路时阻抗继电器的动作行为是：如果振荡中心和短路点都在区内，阻抗继电器一直处于动作状态；如果振荡中心和短路点都在区外，阻抗继电器一直处于不动作状态；如果振荡中心在区内、短路点在区外，在两侧电动势夹角很大而短路点又在区外不远处时阻抗继电器可能会超越；如果振荡中心在区外、短路点在区内，在两侧电动势夹角很大而短路点又在区内靠近保护范围末端时阻抗继电器可能会拒动。如果振荡中发生三相金属性的短路，振荡对阻抗继电器就不产生影响，阻抗继电器可以正确区分区内、外的短路。

（4）非全相运行期间运行相上发生短路的开放元件。

在线路上发生单相接地短路保护跳开单相后，振荡闭锁马上将保护重新闭锁。此时前面所列的三个振荡闭锁开放元件都被撤销，投入本开放元件。从断路器跳开单相后直到重合闸前的大约1～1.5s左右的非全相运行期间，在运行相上可能会发生单相接地短路、两相短路和两相接地短路。由本节二的分析可知，当非全相运行中运行相上发生金属性短路时，接在故障相（相间）上的阻抗继电器是能进行正确测量的，其测量阻抗还是反应短路点到保护安装处的阻抗（之间没有分支电流）。所以其动作行为还是正确的。显然，为了让距离保护切除此时发生的区内短路，振荡闭锁应由本开放元件重新开放保护。

但是在非全相振荡时接在运行相或两运行相间的阻抗继电器如果振荡中心在保护范围内部，是有可能误动的。为了避免距离保护此时的误动，本开放元件应在非全相振荡时不开放保护。所以本开放元件应区分非全相运行（含非全相振荡）和非全相运行中的短路两种状态。

本开放元件只是在判断本端断路器已跳开一相，进入非全相运行期间才投入。判断是哪

动作，整组复归。

（4）$\frac{dR}{dt}$振荡闭锁原理简介。

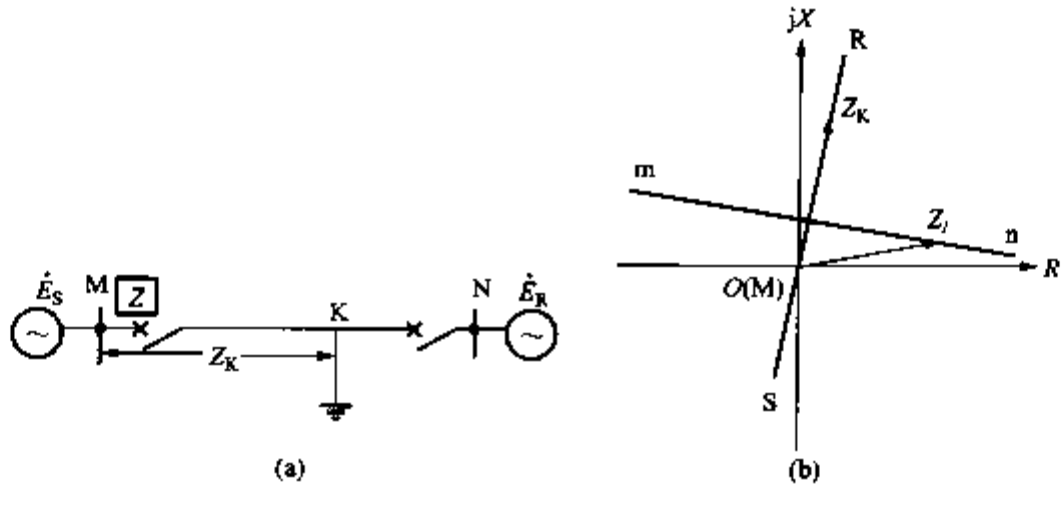


图 3－53 $\frac{dR}{dt}$原理说明

（a）系统图；（b）测量阻抗示意图

$\frac{dR}{dt}$振荡闭锁原理用以区分短路与振荡。当系统发生金属性短路时，装在图 3－53 中 M 端的阻抗继电器的测量阻抗将从 Z_l 跃变到 Z_K，测量阻抗中的电阻分量也有一个很大的跃变，$\frac{dR}{dt}$值很大。随后在短路过程中，无论系统是否发生振荡，其测量阻抗一直是 Z_K，其电阻分量也不变，$\frac{dR}{dt}$值为零。如果是经过渡电阻短路，短路以后的测量阻抗中还有由过渡电阻产生的附加阻抗。如果短路以后并未造成系统振荡，由过渡电阻产生的附加阻抗的相位不变，其测量阻抗的电阻分量也不变，$\frac{dR}{dt}$值仍然是零。即使短路以后造成系统振荡，由过渡电阻产生的附加阻抗的相位随两侧电动势夹角的变化也会发生变化，但它的变化比较缓慢，所以测量阻抗中的电阻分量也缓慢变化，$\frac{dR}{dt}$值较小。所以短路的特征是：一开始$\frac{dR}{dt}$值很大，随后$\frac{dR}{dt}$值很小。当系统没有发生短路而有振荡时，阻抗继电器测量阻抗相量端点的变化轨迹是图 3－53（b）中的 mn 线（设两侧电动势幅值相等），测量阻抗相量的起点在保护安装处 M 点。两侧电动势的夹角从 0°变化到 360°时，测量阻抗相量端点在 mn 线上循环一次，因此其测量阻抗无论是幅值还是相位都在不断变化的。在高压电网中各电气设备的阻抗角基本上在 80°左右，作为 SR 线的中垂线 mn 线比较接近水平线，因而在系统振荡时测量阻抗的电阻分量变化很大，$\frac{dR}{dt}$值一直很大。所以振荡的特征是：$\frac{dR}{dt}$一直很大。于是可以根据$\frac{dR}{dt}$值来区分短路与振荡。

$\frac{dR}{dt}$原理在实现时，装置先自行设定一个$\frac{dR}{dt}$的定值。如果$\frac{dR}{dt}$值超过该定值，随后$\frac{dR}{dt}$值在一段时间内都小于该定值的 1/8，则判断发生了短路故障，开放距离保护。如果不满足上述判据，则认为没有发生短路故障，或认为是系统发生了振荡，距离保护被闭锁。这种用$\frac{dR}{dt}$

N端保护一直发信、不停信。与门6没有输出，与门7就没有动作条件，加之收信机又一直收到本端信号，闭锁了与门7。所以与门7肯定不会有输出，N端保护不发跳闸命令。下面再来看MN线路中远离故障点的M端保护的动作行为。M端如果F_+元件动作的话，其方向元件的动作行为与故障线路两端的方向元件动作行为完全一样，因此前面的动作过程与故障线路的保护动作过程也完全相同。与门6有输出后一方面闭锁与门1停信。另一方面给与门7一个动作条件，但与门7能否有输出要看收信机的收信情况。M端保护自己这一端已停信了，但由于对端——近故障点的N端一直发信，所以收信机一直能收到对端信号，将与门7闭锁。所以M端也不会跳闸。

从上看出，最后故障线路上由于两端都停信，没有闭锁信号，所以两端保护都能跳闸。而非故障线路上由于至少近故障点的一端一直发信，所以非故障线路上一直有闭锁信号，两端保护都不会跳闸。

总结上述分析，保护能发出跳闸命令一定要满足下述一些条件，这些条件的顺序也是微机保护程序中检查的顺序。

（1）高定值起动元件动作。只有高定值起动元件动作后程序才进入故障计算程序，方向元件及各个逻辑功能才进行计算判断，保护才可能跳闸。因此可以说只有高定值起动元件动作后纵联保护才真正开放。否则保护是不开放的，程序执行的是正常运行程序。在正常运行程序中安排的工作只是开入量状态的检查、通道试验等工作。在正常运行程序中是不可能去跳闸的。

（2）F_-元件不动作。

（3）曾经连续收到过8ms的高频信号。

（4）F_+元件动作。同时满足上述四个条件时去停信。

（5）收信机收不到信号。同时满足上述五个条件8ms后即可起动出口继电器，发跳闸命令。

需要指出在故障线路上如果通道异常使收信机收不到对端的高频信号，但两端的高频保护仍然能满足上述五个条件正确切除故障。但在非故障线路上由于通道异常使远离故障点的M端保护收不到近故障点的N端发的高频信号时将可能会造成M端保护的误动，所以使用闭锁信号的高频保护比使用允许信号的高频保护误动的几率高。

2. 对方向元件的要求

对方向元件有下述一些要求：

（1）要有明确的方向性。也就是F_+元件在反方向短路不能误动、F_-元件在正方向短路不能误动。从基本原理分析中可以看出，纵联方向保护是综合比较两端方向元件的动作行为的保护。所以如果方向元件没有明确的方向性的话，保护肯定不会正确动作。读者可自行分析如果F_+元件在反方向短路误动或者F_-元件在正方向短路误动对故障线路和非故障线路各自会产生什么后果。

（2）F_+元件要确保在本线路全长范围内的短路都能可靠动作，只有这样才能满足故障线路的特征，本线路短路才能跳闸。

（3）在保护实现的时候，F_-元件比F_+元件动作得更快、更加灵敏。更加灵敏这一点是靠不同的电流门槛值来完成的。方向元件只有在其所用的电流值大于门槛值后才进行计算，F_-元件的电流门槛低于F_+元件的电流门槛。此外在保护实现中还有一个原则：反方向方向元件闭锁保护优先的原则。任何时候（除母线保护动作以外）只要F_-元件动作，说明

联距离高频保护也要复用载波机。

（3）为防止在系统振荡时保护误动，允许式纵联距离保护也要经过振荡闭锁控制。

2. 允许式纵联方向、纵联距离保护若干原则规定的说明

在前面介绍闭锁式纵联保护时曾结合闭锁式纵联方向保护说明了“四统一”中的一些原则规定的原理，相似的这里要说明一下允许式纵联保护中一些原则规定的原理。介绍时也以纵联方向保护为例，这些规定也适用于纵联距离保护。在学习这里的一些原则规定时可以对照闭锁式纵联保护中相应的一些解释，这里的解释可叙述得简单一些。

在图3－76（b）的简略原理框图中已可看出，在允许式纵联保护中从原理上讲并不一定要用灵敏度不同的两个起动元件。因为在区外短路时即使一端起动元件起动一端起动元件不起动，由于起动元件不起动的一端不会向对端发允许信号，所以并不会造成起动元件起动的一端保护误动。同样由于起动元件不起动的一端不会发允许信号所以也不需要远方停信功能。在超范围允许式纵联高频保护中通道检查不需要像闭锁式那样有一套发信逻辑，因为超范围允许式纵联高频保护要复用载波机，正常运行时载波机一直在发一个功率较小的频率为f_G的导频信号，另一端收到导频信号表明通道是正常的，所以正常运行时通道检查工作是一直在进行着的。根据方向元件或阻抗元件的动作情况由保护控制发的功率较大的频率为f_T的允许信号称作跳频信号。另外在允许式的纵联保护中也不必考虑由通道传输延时等带来的需要加8ms的延时问题等，在发跳闸命令前加有一定延时，如图3－76（b）中的T的延时，是为了抗干扰目的。下面叙述在允许式纵联保护中也需要的与闭锁式纵联保护相似的一些原则规定。

（1）收到三相断路器跳闸位置继电器（TWJ）动作信号以后该做些什么？

1）起动元件未起动、又收到了三相跳闸位置继电器都动作的信号并确认三相均无电流，如果收到对端的信号立即发信100ms，向对端提供允许信号。

这是为了解决在图3－71中所示的N端断路器三相断开，系统由M端给线路充电时，线路上发生短路M端纵联保护拒动问题。因为此时N端断路器三相断开，三相电流是零。起动元件不起动，方向元件也不动作，不能向M端发允许信号。采取本措施后只要M端先把信号发过来，N端收到信号后马上回发允许信号，于是M端纵联方向保护就能动作跳闸了。有些人把这功能称作“三跳回授”功能。

2）在起动元件起动以后又收到任一相跳闸位置继电器动作的信号并确认该相均无电流时马上发信，给对端提供允许信号。

此措施的目的是让对端可靠跳闸。因为这种情况说明本线路上发生了故障，本端断路器已经跳闸了，当然也应该让对端跳闸了。

（2）关于保护动作发信问题。

1）母线保护、失灵保护动作发信。

保护装置上有“其他保护动作”的开入量端子。该开关量接点来自于母线保护和失灵保护动作的接点。采用允许式时保护装置检查到此接点闭合后立即发信。采取此措施是为了解决图3－72所示的短路发生在M端的断路器与TA之间时，N端纵联方向保护拒动问题。因为在该处短路时无论该端断路器是否跳闸M端保护都判为反方向短路，F_+不动作F_-动作。所以M端纵联方向保护既不发跳闸命令也不向N端发允许信号，这导致了N端纵联方向保护也不能发跳闸命令。两端纵联方向保护都不动作。该处短路M端母线保护能够动作，它动作后一方面立即跳闸，另一方面用开关量把母线保护动作的信息通知线路保护。纵联方

下面介绍两种本线路需要补偿的电容电流的计算方法。

在超高压远距离输电线路上分布电容很大，为了避免“电容效应”产生过电压（见本章第六节分析）造成电气设备的损坏，往往在线路上安装并联电抗器，以补偿部分电容电流。所以如果线路上没有安装并联电抗器的话，需要补偿的电容电流就是本线路的电容电流。但是如果线路上安装有并联电抗器的话，需要补偿的电容电流应该是并联电抗器补偿了部分本线路的电容电流以后剩余的电容电流。此外在超高压输电线路上，单相故障是跳单相的，另外两相将通过相间电容与相间互感向故障相提供短路电流，该电流称作潜供电流。具体情况请参阅本章第四节自动重合闸部分。潜供电流的存在使短路点电弧熄灭时间加长，于是重合闸的延时也需要加长。为了减少潜供电流，加快短路点电弧的熄灭，在并联电抗器的中心点另加一个小电抗。

（1）方法一——稳态电容电流的补偿。

在补偿稳态电容电流时，只考虑工频电气量，可以用相序分量方法求得各相上需要补偿的电容电流。图3－83（a）是输电线路上没有安装并联电抗器时的的三相Π型等值电路，图中$C_{\varphi\varphi}$是本线路的相间电容，各分一半在线路两端；C_g是本线路的相对地电容，也各分一半在两端。图（b）是并联电抗器的等值电路。L_φ是并联电抗器每相上的电感，L_f是中心点小电抗的电感。图（c）是利用相序分量时的单相Π型等值电路，并设线路两端都安装有并联电抗器。图（c）中的本线路电容C、本线路容抗X_C、本线路阻抗Z_L，并联电抗器的电感L及并联电抗器的感抗X_L在分析各个序分量时是各序分量的参数。由于本线路的电容C分成均匀的两半各接于线路两端，故其容抗为$-j2X_C$。

本线路的正序电容C_1，负序电容C_2，零序电容C_0与本线路的相间电容$C_{\varphi\varphi}$，相对地电容C_g之间的关系为：

$$\left.\begin{aligned} C_1 &= C_2 = 3C_{\varphi\varphi} + C_g \\ C_0 &= C_g \\ C_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{3}(C_1 - C_0) \end{aligned}\right\} \tag{3-156}$$

并联电抗器的各序分量电感L_1、L_2、L_0与并联电抗器每相上的电感L_φ、中心点小电抗的电感L_f的关系为：

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= L_2 = L_\varphi \\ L_0 &= L_\varphi + 3L_f \end{aligned}\right\} \tag{3-157}$$

考虑到某相上的电容电流是该相正、负、零序电容电流的之和，以及输电线路的正序容抗X_{C1}与负序容抗X_{C2}相等的关系，在图3－83（c）中M端$C/2$中流过的某相上的电容电流$\dot{I}_{MC\varphi}$是该相的正序、负序、零序电容电流之和。其值为：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{MC\varphi} &= \dot{I}_{MC1\varphi} + \dot{I}_{MC2\varphi} + \dot{I}_{MC0} = \left(\frac{\dot{U}_{M\varphi1}}{2X_{C1}} + \frac{\dot{U}_{M\varphi2}}{2X_{C2}} + \frac{\dot{U}_{M0}}{2X_{C0}}\right) \\ &= \left(\frac{\dot{U}_{M\varphi1}}{2X_{C1}} + \frac{\dot{U}_{M\varphi2}}{2X_{C2}} + \frac{\dot{U}_{M0}}{2X_{C0}} + \frac{\dot{U}_{M0}}{2X_{C1}} - \frac{\dot{U}_{M0}}{2X_{C1}}\right) \\ &= \left(\frac{\dot{U}_{M\varphi}}{2X_{C1}} + \frac{\dot{U}_{M0}}{2X_{C0}} - \frac{\dot{U}_{M0}}{2X_{C1}}\right) \end{aligned}$$

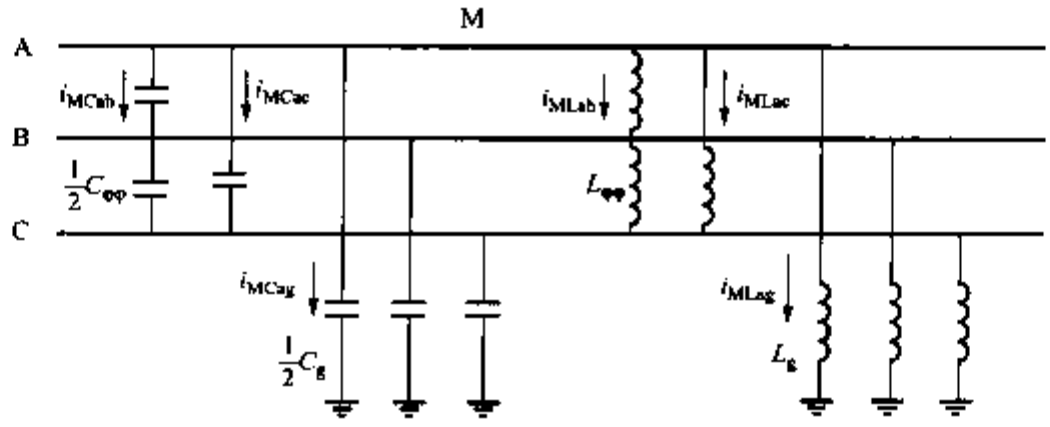


图 3－84 考虑了分布电容和并联电抗器后的三相等值电路

各种频率分量的电容电流，是暂态分量的电容电流。以求 A 相的电容电流为例，在图 3－84 中 M 端 A 相上的电容电流 $i_{MCa}(t)$ 是 AB 相间电容上的电容电流 i_{MCab} 与 AC 相间电容上的电容电流 i_{MCac}、A 相对地电容上的电容电流 i_{MCag} 之和，其值为：

$$i_{MCa}(t)=i_{MCab}(t)+i_{MCac}(t)+i_{MCag}(t)=\frac{C_{\varphi\varphi}}{2}\frac{\mathrm{d}u_{Mab}(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{C_{\varphi\varphi}}{2}\frac{\mathrm{d}u_{Mac}(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{C_g}{2}\frac{\mathrm{d}u_{Ma}(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3-166}$$

同理求得 N 端 A 相上的电容电流 $i_{NCa}(t)$ 为：

$$i_{NCa}(t)=\frac{C_{\varphi\varphi}}{2}\frac{\mathrm{d}u_{Nab}(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{C_{\varphi\varphi}}{2}\frac{\mathrm{d}u_{Nac}(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{C_g}{2}\frac{\mathrm{d}u_{Na}(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3-167}$$

将由式（3－166）、式（3－167）求得的 $i_{MCa}(t)$、$i_{NCa}(t)$ 电流相加得到本线路 A 相上的电容电流 $i_{C\varphi}(t)$，这就是当线路上没有安装并联电抗器时 A 相需要补偿的电容电流：

$$i_{Ca}(t)=i_{MCa}(t)+i_{NCa}(t) \tag{3-168}$$

同理可以求得 B 相、C 相上需要补偿的电容电流。

如果线路上两端安装有并联电抗器，电感中流过的电流与加在电感上的电压有如下关系：

$$u(t)=L\frac{\mathrm{d}i_L(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3-169}$$

式（3－169）也是对各种频率的信号都是适用的。于是得到：

$$\frac{\mathrm{d}i_L(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{L}u(t) \tag{3-170}$$

将式（3－170）从过去时刻（$t-\Delta t$）到当前时刻 t 积分，得到：

$$i_L(t)=i_L(t-\Delta t)+\frac{1}{L}\int_{t-\Delta t}^{t}u(t)\mathrm{d}t \tag{3-171}$$

$i_L(t-\Delta t)$ 是过去时刻（$t-\Delta t$）时的电感电流值，它是根据式（3－171）从（$t-2\Delta t$）到（$t-\Delta t$）积分求得的值。

所以在图 3－84 中以 A 相为例，M 端并联电抗器 A 相上的电感电流 $i_{MLa}(t)$ 是 AB 相间电感上的电感电流 $i_{MLab}(t)$ 与 AC 相间电感上的电感电流 $i_{MLac}(t)$、A 相对地电感上的电感电流 $i_{MLag}(t)$ 之和，其值为：

$$\begin{aligned}i_{MLa}(t)&=i_{MLab}(t)+i_{MLac}(t)+i_{MLag}(t)\\&=i_{MLab}(t-\Delta t)+\frac{1}{L_{\varphi\varphi}}\int_{t-\Delta t}^{t}u_{Mab}(t)\mathrm{d}t+i_{MLac}(t-\Delta t)\end{aligned}$$

式中：φ 为 A、B、C。由于是分相差动，所以有选相功能。工频变化量差动继电器也做成比率制动特性。由于工频变化量继电器是工作在暂态过程中的，所以其起动电流 I_{qd} 值与上述稳态 I 段取值相同，可取为正常运行情况下本线路电容电流的 4 ~ 6 倍。

前已述及在重负荷的输电线路内部发生经高阻接地时差动继电器的灵敏度可能不够。因为正如式（3 - 155）所示的，此时由于短路电流不很大而动作电流较小，但由于负荷电流很大而制动电流较大。对付这些问题恰好是工频变化量继电器的长处。

工频变化量差动继电器的特点是：

（1）不反应负荷电流，负荷电流已不再成为制动电流了，原因是在求电流变化量时已把负荷分量减掉了。所以凡是工频变化量的继电器都不反应负荷分量，它只反应故障分量，反应的是短路附加状态里的电气量。所以穿越性的负荷电流总是差动继电器的制动电流这一点对于工频变化量差动继电器来说是不成立的。

（2）受过渡电阻的影响小。所以工频变化量差动继电器很灵敏，用它来解决重负荷输电线路内部发生经高阻接地时差动继电器的灵敏度问题是十分理想的。

3. 零序差动继电器

用输电线路两端的零序电流构成差动继电器。其动作电流和制动电流分别为：

$$\left.\begin{aligned} I_{d0} &= |\dot{I}_{M0} + \dot{I}_{N0}| \\ I_{r0} &= |\dot{I}_{M0} - \dot{I}_{N0}| \end{aligned}\right\} \tag{3-178}$$

由于该继电器反应的是两端零序电流的关系，没有选相功能，所以应再用稳态量的分相差动继电器选相。零序差动继电器与稳态量的分相差动继电器构成“与”逻辑延时 100ms 选跳故障相。零序差动继电器也做成比率制动特性，它有如下特点：

1）该继电器比率制动特性中的起动电流 I_{qd} 只需躲过外部接地短路时本线路的稳态零序电容电流以及外部相间短路（不接地）时的稳态零序不平衡电流。该值比较小，一般可取为与整套保护的零序起动元件的起动电流定值一致。

2）由于负荷电流是正序分量的电流，因而负荷电流也不成为该继电器的制动电流。

3）零序电流受过渡电阻的影响也较小。由于上述原因，零序差动继电器很灵敏，可用以解决重负荷线路内部经高阻短路时的灵敏度问题。作为选相用的稳态量分相差动继电器也要做成高灵敏度的，以不影响零序差动继电器的灵敏度。

（五）电流互感器断线时防止纵联电流差动保护误动的措施及“长期有差流”的告警信号

正常运行时当输电线路一端的 TA 断线时差动继电器的动作电流和制动电流都等于未断线一端的负荷电流。由于差动继电器的制动系数 K_r 小于 1，起动电流 I_{qd} 值又较小，因此工作点将落在比率制动特性的动作区内造成差动继电器动作。为避免这时差动保护的误动，需要找出一端 TA 断线与本线路内部短路两种情况下两端差动保护动作行为的区别。当本线路内部短路时两端的起动元件都是动作的，但一端 TA 断线时 TA 未断线侧的起动元件是不起动的，只有 TA 断线一端的起动元件可能起动。因此采用只有两端起动元件都起动，两端差动继电器都动作的情况下纵联电流差动保护才能发跳闸命令的措施，就可以避免正常运行下 TA 断线的误动。为此，每一端纵联电流差动保护跳闸出口必须满足下述几个条件（与）：① 本端起动元件起动。② 本端差动继电器动作。同时满足上两个条件，向对端发“差动动作”的允许信号。③ 收到对端“差动动作”的允许信号。表明对端起动元件、差动继电器也已动作。

2. 反向短路

反方向短路时的短路附加状态如图 3－87 所示。加在继电器里的电压 $\Delta\dot{U}_m$、电流 $\Delta\dot{I}_m$ 的正方向的规定与正向短路时相同。从图可看出有如下关系式

$$\Delta\dot{U}_m = \Delta\dot{I}_m Z_R \tag{3-183}$$

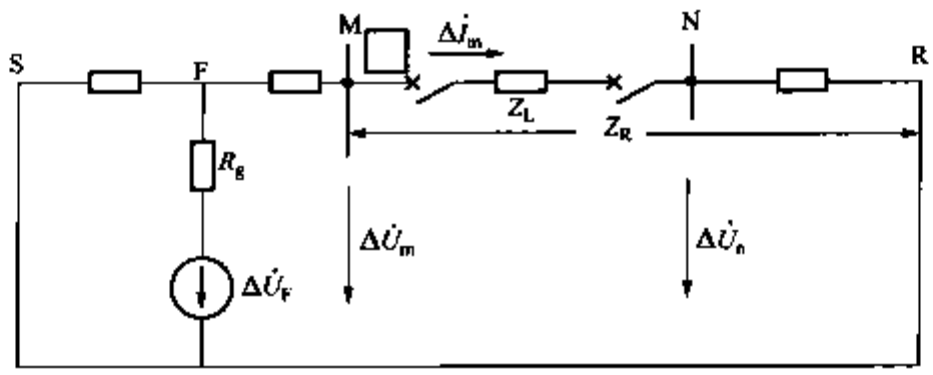


图 3－87 反向短路时的短路附加状态

式中：Z_R 是保护安装处正方向的等值正序阻抗。该式说明反方向短路时保护安装处电压的变化量 $\Delta\dot{U}_m$ 实际上是电流变化量在保护正方向等值阻抗 Z_R 上的压降。当 $\Delta\dot{U}_m$ 是相间电压的变化量 $\Delta\dot{U}_{\varphi\varphi}$，或者是相电压的变化量 $\Delta\dot{U}_\varphi$ 时，式（3－183）演变成：

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{\varphi\varphi} &= \Delta\dot{I}_{\varphi\varphi} Z_R \\ \Delta\dot{U}_\varphi &= (\Delta\dot{I}_\varphi + K_R 3\dot{I}_0) Z_R\end{aligned}\right\} \tag{3-184}$$

式中：K_R 是保护正方向等值系统里的零序电流补偿系数。φ 代表相 A、B、C；$\varphi\varphi$ 代表相间 AB、BC、CA。式（3－183）和式（3－184）是工频变化量继电器在反方向短路的基本关系式。假如 Z_R 的阻抗角是 90°，那么根据上两式可得到：

$$\left.\begin{aligned}&\arg\frac{\Delta\dot{U}_m}{\Delta\dot{I}_m} = \arg Z_R \approx 90^\circ \\ &\arg\frac{\Delta\dot{U}_{\varphi\varphi}}{\Delta\dot{I}_{\varphi\varphi}} = \arg Z_R \approx 90^\circ \\ &\arg\frac{\Delta\dot{U}_\varphi}{\Delta\dot{I}_\varphi + K_R 3\dot{I}_0} = \arg Z_R \approx 90^\circ\end{aligned}\right\} \tag{3-185}$$

该式说明，反向短路时加在工频变化量继电器里的电压和电流的夹角只与保护正方向的等值正序阻抗的阻抗角有关，其值等于该阻抗的阻抗角。而与过渡电阻 R_g 的大小无关。

比较式（3－182）和式（3－185）可知：正方向短路和反方向短路时，加在保护上的电压变化量和电流变化量之间的夹角截然相反。因此利用这个原理比较电压和电流变化量之间的相位就可以构成方向继电器。

（二）工频变化量方向继电器的实现方法

式（3－182）和式（3－185）表明用比较电压和电流变化量之间的相位就可以构成工频变化量方向继电器。那么具体构成继电器时到底是比较相间电压变化量 $\Delta\dot{U}_{\varphi\varphi}$ 和两相电流之差变化量 $\Delta\dot{I}_{\varphi\varphi}$ 之间的相位呢？还是比较相电压变化量 $\Delta\dot{U}_\varphi$ 和相电流加带补偿的零序电流

保护做不到的。零序方向继电器如果用母线 TV 的话在非全相运行中是要误动的，所以纵联零序方向保护在非全相运行期间将退出。

（8）用 $\Delta U_{\varphi\varphi}$、$\Delta I_{\varphi\varphi}$构成的工频变化量方向继电器不反应零序分量。因此由该继电器构成的纵联方向保护不像纵联零序方向保护那样在同杆平行线路上，受线间零序互感的影响可能会误动。

（9）假如使用母线 TV，在断路器合闸或跳闸时如果有电流突变量，工频变化量方向继电器会误认为“正方向短路”而动作。

下面以断路器合闸为例分析工频变化量方向继电器的动作行为。在图 3－88 中电压和电流的正方向按传统规定的方向，图中电压的箭头方向是电位降的方向。图 3－88（a）为合闸后状态，现分析 MN 线路 M 端的继电器。$\Delta\dot{I}$ 电流可认为是两个电流源的叠加，一个是 $\Delta\dot{I}$，另一个是 $\dot{I}=0$。根据重叠原理（a）图可分解成（b）、（c）两图的叠加。其中（b）图线路中的电流为零，这是合闸前的空载状态。（c）图是合闸附加状态。工频变化量方向继电器用的是（c）图的合闸附加状态里的电气量。从（c）图可见 $\Delta\dot{U}=-\Delta\dot{I}Z_S$。该式与式（3－180）所示的正方向短路的基本关系式完全相同，所以工频变化量方向继电器误认为“正方向短路”。同样装在 N 端的工频变化量方向继电器也认为“正方向短路”，这将造成纵联工频变化量方向保护误动。这表明，在“合闸后”的保护中，无论是手动合闸后还是自动重合闸后的保护中都不能使用由工频变化量方向继电器构成的纵联方向保护，否则断路器始终是合不上的。

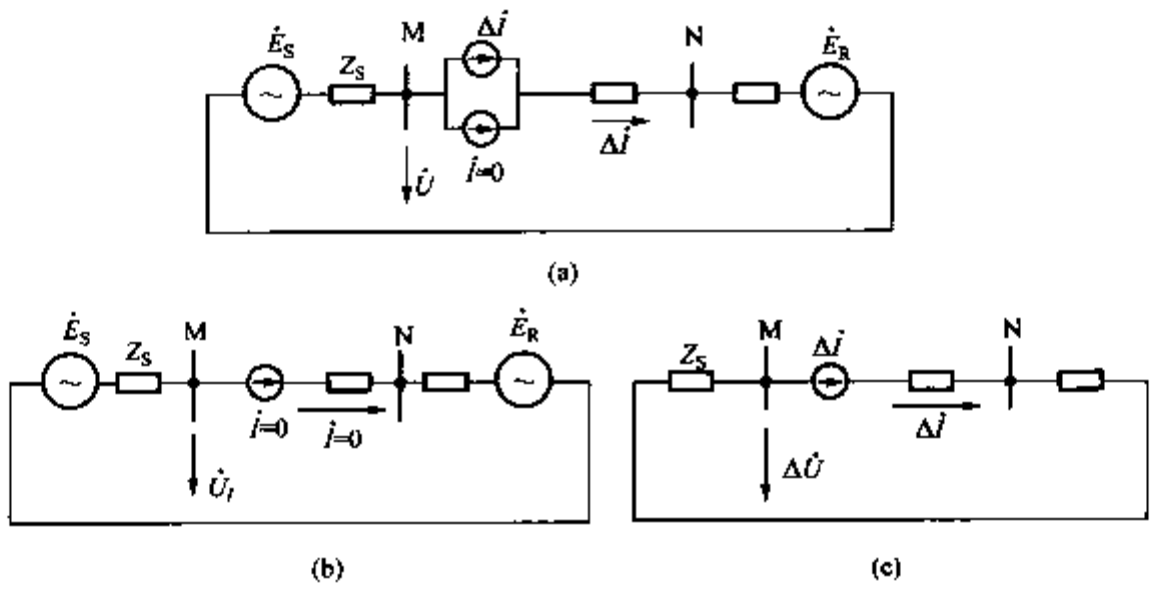


图 3－88 断路器合闸时的重叠原理图

（a）合闸后状态；（b）合闸前空载状态；（c）合闸附加状态

（10）Z_{com}的作用。在正方向方向元件测量角度时用到的式（3－188）中引入了补偿阻抗 Z_{com}。引入补偿阻抗 Z_{com}的目的是使当保护背后运行方式很大时（Z_S 很小），在长线路（Z_L 很大）末端短路时正方向的方向元件能可靠动作。在正方向短路时保护安装处的电压变化量 $\Delta\dot{U}_{\varphi\varphi}$是电流的变化量 $\Delta\dot{I}_{\varphi\varphi}$在保护背后等值阻抗 Z_S 上的压降。由于此时 Z_S 很小，再加上在长线路末端短路时 $\Delta\dot{I}_{\varphi\varphi}$也很小，所以保护安装处的电压变化量 $\Delta\dot{U}_{\varphi\varphi}=-\Delta\dot{I}_{\varphi\varphi}Z_S$ 的值很小。如果在式（3－188）中不引入 Z_{com}，$\varphi_{\varphi\varphi+}$ 角度计算中比较相位的两个量中有一个量将因为接近于零而不能正确比相。此时在正方向的方向元件的算法中因其没有超过门槛值，正方向的方向元件一直没有动作。而从纵联方向保护的原理上讲，正方向的方向元件是

目前在系统中使用的在三相跳闸后重合闸的检查条件有下述几种：

（一）检查线路无压和检查同期重合闸

这是目前应用最多的一种检查条件的重合闸。设图3－91中MN线路的M端装有检查线路无压重合闸，N端装有检查同期重合闸。当MN线路上发生短路，两端三相跳闸后，线路上三相电压为零。所以M端检查到线路无电压满足了检查条件，经三相重合闸动作时间后发合闸命令。随后N端检查到母线、线路均有电压，且母线与线路的同名相电压的相角差在整定值中规定的允许范围内，经三相重合闸动作时间后即可发出合闸命令，这时N端合闸是满足同期条件的。使用这种检查条件的重合闸一定要给装置既提供母线电压，也要提供线路电压。

图3－91 检查线路无压和检查同期重合闸

从上述动作过程可以看出，检查线路无电压端总是先重合的。因此该端有可能重合在故障线路上再次跳闸。所以该端断路器有可能在短时间内需切除两次短路电流，工作条件相对恶劣。检查同期端是在线路有压且满足同期条件后才重合的，所以肯定重合在完好的线路上，断路器的工作条件相对好一些。为了均衡负担，检查线路无压端和检查同期端可定期倒换。但是如果是发电厂的出线，该端一般都定为检查同期端。

为了在断路器“偷跳”后能用重合闸补救，一般在检查线路无压端将检查同期的功能也投入。因为否则在断路器“偷跳”后由于线路一直有电压，重合闸无法发合闸命令。投入检同期的功能后就可用检查同期的方法重合。需要特别指出，在检查同期端检查线路无电压的功能千万不能投入。否则两端均有检线路无电压的功能，在两端断路器跳闸后两端可能同时合闸造成非同期合闸。

目前在线路保护中，均提供了上述两种检查条件的重合闸。检查线路无电压的条件是：线路电压小于30V，同时线路TV没有断线。检查同期的条件是：首先线路、母线电压都大于40V，再满足线路和母线同名相电压的相位差在定值整定的范围内。目前要求检查同期重合闸中提供给保护的线路电压可以是任一相电压或任一相间电压，保护应有自适应功能。如果定值单中的同期合闸角为φ_{set}，正常运行时保护测量到的线路电压与母线A相电压的夹角为φ。在检同期时只要测量到线路电压与母线A相电压的夹角在（$\varphi-\varphi_{set}$）至（$\varphi+\varphi_{set}$）的范围内即认为满足同期的条件。

（二）重合闸不检方式

对于不存在同期问题的线路上的重合闸在三相跳闸后可采用重合闸不检方式。例如在单侧电源线路上的重合闸，就可采用此种方式。这种方式的重合闸，只要起动以后经过延时就可发合闸命令。

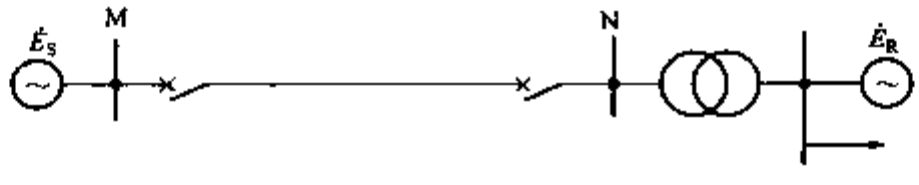


图3－92 系统图

注 在上述（一）、（二）两点中所述及的三相跳闸后的重合闸检查条件是最常用的几种，给使用也会带来很多方便。例如在图3－92系统中，如果$\dot{E}_S$电源是一直有的，$\dot{E}_R$电源有时存在有时不存在。在

而又是重合于永久性故障上，保护再去跳 2 号断路器，如果万一此时 2 号断路器失灵，2 号断路器的失灵保护再将 3、8 号断路器跳开，这将影响 L_2 连接元件的工作。所以不能先合中断路器 2。如果先合边断路器 1，也是重合于永久性故障上，保护再去跳 1 号断路器，如果万一此时 1 号断路器失灵，1 号断路器的失灵保护再将 I 母上所有断路器（如图中 4 号断路器）都跳开，L_2 连接元件与其他各连接元件的工作都不受影响。所以当线路保护跳开两个断路器后应先合边断路器，后合中断路器。如果边断路器重合不成功，合于故障线路，保护再次将边断路器跳开，此时中断路器就不再重合而且发三跳命令。

由于图 3－95 中与 L_1 线路相连的有 1 号、2 号两个断路器，两个断路器都要进行重合，且两个断路器的重合有一个先后顺序问题，因此重合闸不应设置在线路保护装置内，而应按断路器单独设置。此外这两个断路器的失灵保护跳闸对象也不一样，所以失灵保护也应按断路器单独设置。因此一般在 3/2 接线方式中，把重合闸和断路器失灵保护做在单独的一个装置内，称作断路器保护装置，在每一个断路器处配置一套该装置。有关断路器保护的内容请参阅本书第四章。

九、220kV 及以上电压等级同杆并架双回线路的按相自动重合闸方式

（一）同杆并架双回线路上按常规原理构成的保护和重合闸会产生的问题

（1）在发生跨线故障时可能会同时切除两回线。在同杆并架线路上出现跨线故障时，反应一端电气量的选相元件有时无法实现正确的选相。例如在图 3－96 中 N 端出口发生 I B II CG（指 I 回线的 B 相和 II 回线的 C 相短路接地）的跨线故障与在 N 端出口发生 I 回线的 BC 两相接地短路相比较，M 端 I 回线中 B、C 相流过的电流 I_{1MB}、I_{1MC}是完全相同的，M 端母线上的电压也是完全相同的。因此 M 端 I 回线中的反应一端电气量变化的选相元件无法区别是本线路末端的 B、C 两相接地短路还是线路末端的 B、C 跨线接地短路。按原来的保护配置，在发生这种跨线故障时两条线路都将三跳且不再重合（采用单相重合闸方式）。其实在发生上述跨线故障时，如果 I 回线两端跳 B 相，II 回线两端跳 C 相，故障就可被切除。两侧母线间还有四根导线相连，还包括一个完整的三相，这对安全稳定运行是很有利的。

（2）重合闸可能合闸于永久性的相间故障上。在 220kV 及以上电压等级线路上，很多系统为了避免重合于永久性的相间短路给系统带来的严重冲击，往往采用相间故障不重合的措施（使用单相重合闸方式）。可是在同杆并架线路上发生跨线故障时，即使保护装置可以选跳故障相（例如采用分相电流差动保护），例如在图 3－96 中 I 回线跳 B 相，II 回线跳 C 相，两条线路都同时重合还是可能合于永久性的 B、C 两相跨线故障线路上。

（3）同杆并架线路上线间互感较大，另一回线路的零序电流通过线间互感在本线路上产生的感应电压将改变线路上的压降，从而影响接地阻抗继电器的测量阻抗。例如在图 3－96 中，如果发生的是跨线的金属性两相接地短路，则 M 母线的 B 相电压为：

$$\dot{U}_{MB}=(\dot{I}_{1MB}+K3\dot{I}_{0I}+K'3\dot{I}_{0II})Z_{1K} \tag{3-216}$$

式中 $\dot{I}_{0I}$、$\dot{I}_{0II}$——I 回线、II 回线的零序电流；

K——I 回线的零序电流补偿系数。

$K'=\dfrac{Z_m}{Z_{1K}}$，其中 Z_m 是在 Z_{1K}范围内两回线的线间互感阻抗（每相值）。

因此第 I 回线 M 端 B 相接地阻抗继电器，由于没有采用另一回线的零序电流进行补偿，其测量阻抗为：

$$\left.\begin{aligned}\Delta I_{AB}&=|\Delta\dot{I}_A-\Delta\dot{I}_B|=|(a^2-a)C_1\Delta\dot{I}_{FA2}+(a^2-1)C_1\Delta\dot{I}_{FA0}|\\&=|(1-a)C_1\Delta\dot{I}_{FA2}+(1-a^2)C_1\Delta\dot{I}_{FA1}|\\\Delta I_{BC}&=|\Delta\dot{I}_B-\Delta\dot{I}_C|=|2(a-a^2)C_1\Delta\dot{I}_{FA2}+(a-a^2)C_1\Delta\dot{I}_{FA0}|\\&=|(a-a^2)C_1\Delta\dot{I}_{FA2}+(a^2-a)C_1\Delta\dot{I}_{FA1}|\\\Delta I_{CA}&=|\Delta\dot{I}_C-\Delta\dot{I}_A|=|(a^2-a)C_1\Delta\dot{I}_{FA2}+(1-a)C_1\Delta\dot{I}_{FA0}|\\&=|(a^2-1)C_1\Delta\dot{I}_{FA2}+(a-1)C_1\Delta\dot{I}_{FA1}|\end{aligned}\right\}\tag{3-224}$$

从式（3－223）、式（3－224）可见，两相接地短路（BC）时三个两相电流差的变化量幅值都较大。考虑到 $\Delta\dot{I}_{FA1}$ 与 $\Delta\dot{I}_{FA2}$ 相位相反的关系后可知两个故障相的两相电流差的变化量（$\Delta\dot{I}_{BC}$）其值最大。非故障相相电流的变化量（$\Delta\dot{I}_A$）较小，如果各序电流分配系数相等时非故障相电流的变化量为零。两个接地相相电流的变化量（$\Delta\dot{I}_B$、$\Delta\dot{I}_C$）也较大。B、C 两相短路接地时电流变化量的相量图如图 3－98（c）所示。

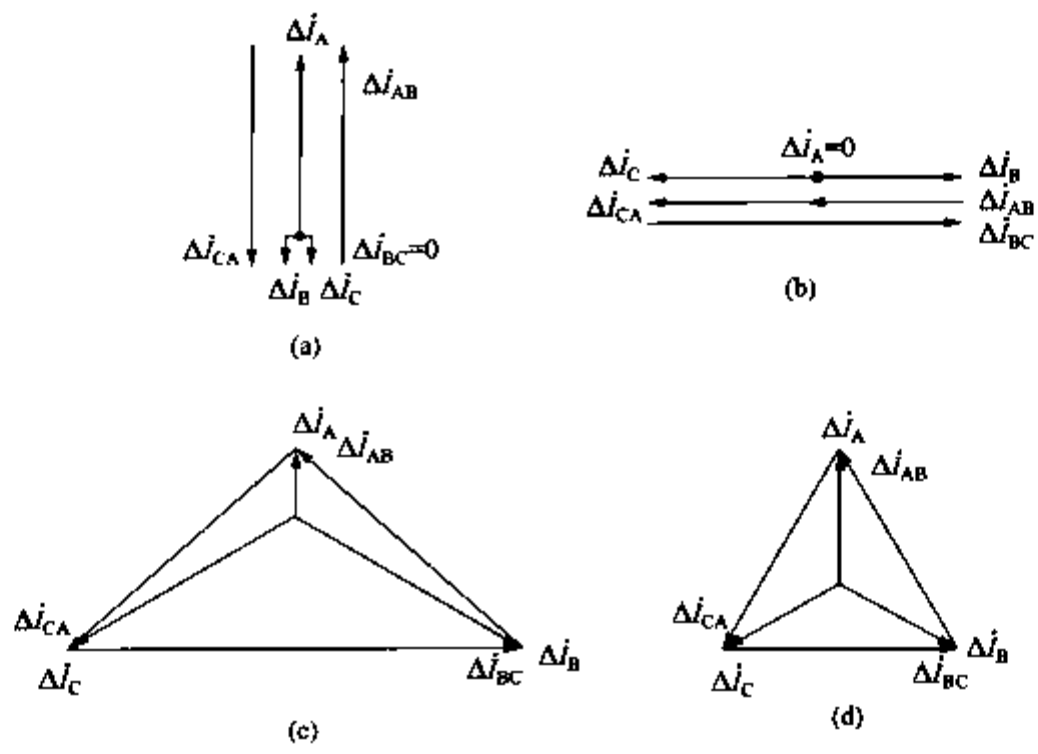


图 3－98 各种短路类型下电流变化量的相量图

（a）$K_A^{(1)}$（$C_0<C_1$）；（b）$K_{BC}^{(2)}$；（c）$K_{BC}^{(1,1)}$；（d）$K^{(3)}$

4. 三相短路 $K^{(3)}$

流过保护 A 相的正序电流的变化量为：$\Delta\dot{I}_{A1}=C_1\Delta\dot{I}_{FA1}$。考虑到三相短路时有 $\Delta\dot{I}_{FA2}=\Delta\dot{I}_{FA0}=0$ 的关系后，流过保护的各相电流的变化量分别为：

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{I}_A&=\Delta\dot{I}_{A1}=C_1\Delta\dot{I}_{FA1}\\\Delta\dot{I}_B&=a^2\Delta\dot{I}_{A1}=a^2C_1\Delta\dot{I}_{FA1}\\\Delta\dot{I}_C&=a\Delta\dot{I}_{A1}=aC_1\Delta\dot{I}_{FA1}\end{aligned}\right\}\tag{3-225}$$

从式（3－225）可得到三个两相电流差的变化量为：

即对于无损线路而言，衰减系数$\beta=0$，而且相位系数α为：

$$\alpha=\omega\sqrt{L_0C_0} \tag{3-261}$$

其波速、波长分别为：

$$v_p=\frac{\omega}{\alpha}=\frac{1}{\sqrt{L_0C_0}} \tag{3-262}$$

$$\lambda=\frac{\omega}{f\alpha}=\frac{1}{f\sqrt{L_0C_0}} \tag{3-263}$$

对架空输电线路，$L_0C_0=\varepsilon_0\mu_0$，其中真空的介电系数$\varepsilon_0=\frac{1}{36\pi}\times10^{-9}\text{F/m}$，真空的导磁系数$\mu_0=4\pi\times10^{-7}H/A$，如果把架空线路当作无损线路，则线路上的波速为：

$$v_p=\frac{1}{\sqrt{L_0C_0}}=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\approx3\times10^8\text{m/s}$$

即波速近似为光速。

对于50Hz工频频率的架空线路，其波长为：

$$\lambda=\frac{v_p}{f}\approx\frac{3\times10^8}{50}=6\times10^3\text{m}=6000\text{km}$$

2. 反射系数

式（3-248）和式（3-251）表达的是用终端电压$\dot{U}_2$和电流$\dot{I}_2$表达的，距始端x处的电压、电流。距始端x也就是距终端x'处。所以如果以x'作为自变量，式（3-248）和式（3-251）也可写成：

$$\dot{U}(x')=\dot{U}_2'e^{\gamma x'}+\dot{U}_2''e^{-\gamma x'}=\frac{1}{2}(\dot{U}_2+Z_C\dot{I}_2)e^{\gamma x'}+\frac{1}{2}(\dot{U}_2-Z_C\dot{I}_2)e^{-\gamma x'}=\dot{U}'(x')+\dot{U}''(x')$$

$$\dot{I}(x')=\frac{\dot{U}_2'}{Z_C}e^{\gamma x'}-\frac{\dot{U}_2''}{Z_C}e^{-\gamma x'}=\frac{1}{2}\left(\frac{\dot{U}_2}{Z_C}+\dot{I}_2\right)e^{\gamma x'}-\frac{1}{2}\left(\frac{\dot{U}_2}{Z_C}-\dot{I}_2\right)e^{-\gamma x'}=\dot{I}'(x')-\dot{I}''(x') \tag{3-264}$$

上式中的$\dot{U}(x')$、$\dot{I}(x')$都有两项构成，第一项为入射波，随x'的增大（x的减少）而增大，即从始端向终端衰减；第二项为反射波，由终端向始端衰减。

根据终端边界条件$x'=0$，则终端处的电压入射波和反射波为：

$$\begin{aligned}\dot{U}'(0)&=\dot{U}_2'\\ \dot{U}''(0)&=\dot{U}_2''\end{aligned} \tag{3-265}$$

终端电压反向行波与正向行波的比值称作电压反射系数N_U，如果终端的负载阻抗为Z_2，有$\dot{U}_2=\dot{I}_2Z_2$关系。则反射系数N_U为：

$$N_U=\frac{\dot{U}''(0)}{\dot{U}'(0)}=\frac{\dot{U}_2''}{\dot{U}_2'}=\frac{\frac{1}{2}(\dot{U}_2-\dot{I}_2Z_C)}{\frac{1}{2}(\dot{U}_2+\dot{I}_2Z_C)}=\frac{\dot{I}_2Z_2-\dot{I}_2Z_C}{\dot{I}_2Z_2+\dot{I}_2Z_C}=\frac{Z_2-Z_C}{Z_2+Z_C} \tag{3-266}$$

N_U一般为复数。同样对于电流有电流反射系数N_I，它为：

$$\dot{U}_2=\frac{\dot{U}_1}{\cos\left(\frac{2\pi}{6000}\cdot l\right)}$$

如果设终端电压 $\dot{U}_2=U_2\angle 0°$，则与式（3－281）对应的电压、电流瞬时值的表达式为：

$$u_{oc}=\mathrm{Im}[\sqrt{2}\dot{U}_{oc}e^{j\omega t}]=U_{2m}\cos\alpha x'\sin\omega t=\dot{U}_{2m}\cos\frac{2\pi}{\lambda}x'\sin\omega t$$

$$i_{oc}=\mathrm{Im}[\sqrt{2}\dot{I}_{oc}e^{j\omega t}]=\mathrm{Im}\left[\sqrt{2}\frac{\dot{U}_2}{z_c}e^{j\frac{\pi}{2}}\sin\alpha x'e^{j\omega t}\right]=\frac{U_{2m}}{z_c}\sin\alpha x'\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)\qquad(3-283)$$

$$=\frac{U_{2m}}{z_c}\sin\frac{2\pi}{\lambda}x'\cos\omega t$$

式（3－283）表明，线路上各点的电压和电流均随时间 t 作正弦或余弦变化，而其电压的振幅 $U_{2m}\cos\frac{2\pi}{\lambda}x'$ 随 x' 作余弦变化，电流振幅 $\frac{U_{2m}}{z_c}\sin\frac{2\pi}{\lambda}x'$ 随 x' 作正弦变化，如图 3－107 所示。在距终端 $x'=2n\left(\frac{\lambda}{4}\right)$（$n=0,1,2,3,\cdots$），即 $x'=0,\frac{\lambda}{2},\lambda,\cdots$ 各处，$\cos\frac{2\pi}{\lambda}x'$ 的值为 ±1。因此在这些位置上电压振幅出现最大值，即其最大瞬时值大于其他各处同一时间的最大瞬时值（该瞬时值的大小在随时间 t 作正弦变化），它们称之为电压的波腹。而在 $x'=(2n+1)\left(\frac{\lambda}{4}\right)$（$n=0,1,2,3,\cdots$），即 $x'=\frac{\lambda}{4},\frac{3\lambda}{4},\frac{5\lambda}{4},\cdots$ 各处，$\cos\frac{2\pi}{\lambda}x'$ 的值为零，因而这些地方的电压振幅恒为零，其瞬时值的大小随时间 t 一直是零，它们称之为电压的波节。在 $x'=0,\frac{\lambda}{2},\lambda,\cdots$ 各处，$\sin\frac{2\pi}{\lambda}x'$ 的值为零，出现电流的波节，而在 $x'=\frac{\lambda}{4},\frac{3\lambda}{4},\frac{5\lambda}{4},\cdots$ 各处，出现电流的波腹。即电压的波腹处是电流的波节，电压的波节处是电流的波腹。只要频率确定（波长确定），上述波腹、波节处的位置不变，电压波、电流波是驻立不动的波。与行波相对照，将它称之为驻波。驻波在空间位置（x'）上不移动，但其幅值随时间 t 作正弦变化。显然线上各处电压和电流在时间相位上相差 $\pi/2$。

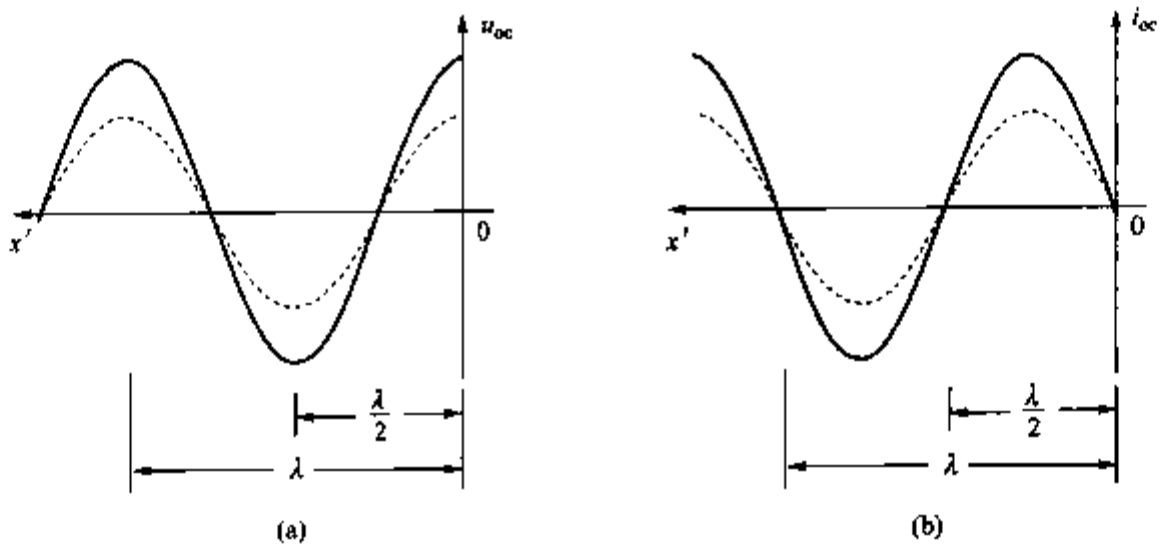


图 3－107　终端开路时，不同时刻电压、电流的沿线分布

（a）电压沿线分布；（b）电流沿线分布

式中 p'_m、p'_u 分别是功率电平表读数值（dBm）和电压电平表读数值（dBu）。电平表实质上是电压表，它输入的是电压量。所不同的是它不是以电压单位伏特（V）刻度的，而是以 $p_u=20\lg(U/0.775)$ 规律刻度。当输入电压为 0.775V 时对应的读数是 0dBu。反之，如果某测试点的电压电平表读数为 p_u，则该点的电压为 $U=0.775\times10^{p_u/20}$。所以无论被测点的负载阻抗为多少，只要电压相等，测得的电压电平值是相同的。

（2）相对电平。如果式（3－288）～式（3－293）中，被测试点的功率 P_1、电压 U_1、电流 I_1 不是与基准功率 P_0、基准电压 U_0、基准电流 I_0 相比，而是与电路中的另一点功率 P_2、电压 U_2、电流 I_2 相比得到的电平值为这两点的相对电平值。

$$p_{rw}=10\lg\frac{P_1}{P_2}=10\lg\left(\frac{P_1}{P_0}\cdot\frac{P_0}{P_2}\right)=10\lg\frac{P_1}{P_0}-10\lg\frac{P_2}{P_0}=p_{a1w}-p_{a2w}\ (\text{dB}) \tag{3-295}$$

$$p_{ru}=20\lg\frac{U_1}{U_2}=20\lg\frac{U_1}{U_0}-20\lg\frac{U_2}{U_0}=p_{a1u}-p_{a2u}\ (\text{dB}) \tag{3-296}$$

$$p_{ri}=20\lg\frac{I_1}{I_2}=20\lg\frac{I_1}{I_0}-20\lg\frac{I_2}{I_0}=p_{a1i}-p_{a2i}\ (\text{dB}) \tag{3-297}$$

式中：p_r 为相对电平，p_a 为绝对电平。

式（3－295）～式（3－297）三个式子表明，电路中任意两点的相对电平等于该两点绝对电平之差。在一般电路中 P_1 为发送端功率，P_2 为接收端功率。如果 $P_1>P_2$，则相对电平为正值，表示功率衰耗。反之如果 $P_1<P_2$，则相对电平为负值，表示功率增益。

（3）分贝（dB）和奈贝（Np）的转换关系为：1dB＝0.115Np，1Np＝8.686dB。

（4）采用电平计量单位的优点。

1）在原先单位中相差若干个数量级的电气量如果用电平单位来表示其数值就很接近，便于运算。例如对 1mW 的功率对应的是 0dBm，对 1W 的功率对应的是 30dBm，对 10W 的功率对应的是 40dBm。

2）如果各个环节以电平表示的衰耗（或增益）已知，那么总的衰耗是各环节电平衰耗（或增益）之和。用加、减法代替乘、除法计算方便。例如在图 3－113 的电路中，各环节的输入、输出功率分别为 P_1、P_2、P_3、P_4。各环节的衰耗（或增益）是 b_1、b_2、b_3，其值分别为：

$$\left.\begin{aligned}b_1&=10\lg\frac{P_1}{P_2}\\b_2&=10\lg\frac{P_2}{P_3}\\b_3&=10\lg\frac{P_3}{P_4}\end{aligned}\right\} \tag{3-298}$$

这三个环节的总衰耗 b_Σ 为：

$$b_\Sigma=10\lg\frac{P_1}{P_4}=10\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\cdot\frac{P_2}{P_3}\cdot\frac{P_3}{P_4}\right)=10\lg\frac{P_1}{P_2}+10\lg\frac{P_2}{P_3}+10\lg\frac{P_3}{P_4}=b_1+b_2+b_3 \tag{3-299}$$

式（3－299）表明，使用电平作为计量单位以后，电路中的总衰耗（或增益）是该电路中各环节衰耗（或增益）之和，计算十分方便。由此可以推论，载波通道的总衰耗 b 等于输电线路的衰耗 b_l、结合滤波器的衰耗 b_{CF}、高频电缆的衰耗 b_C、阻波器的分流衰耗 b_{LT}、

线路的终端衰耗 b_T 之和：

$$b = b_l + b_{CF} + b_C + b_{LT} + b_T \tag{3-300}$$

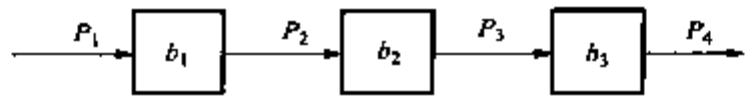


图 3－113 电路的衰耗（或增益）

3）对输电线路和高频电缆这样的分布参数电路，在阻抗完全匹配的情况下其输入端和输出端的功率比值为：

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{2\beta l} \tag{3-301}$$

因此以奈贝表示的衰耗为：

$$b = \frac{1}{2}\ln\frac{P_1}{P_2} = \beta l \qquad (\text{Npm}) \tag{3-302}$$

折合成分贝为：

$$b = 8.686\beta l \qquad (\text{dBm}) \tag{3-303}$$

式中：β 为波传输中的衰减常数（奈贝/km）；l 为分布参数电路的长度（km）。用式(3－303)后运算方便。

2. 四端网络的各种衰耗及测试方法

（1）固有衰耗 b_0。

它表示当四端网络匹配连接（负载阻抗与四端网络的特性阻抗相等）时，输入端与输出端的相对功率电平。但是在载波通道中，在整个工作频带内负载阻抗与四端网络的特性阻抗都完全相等是不可能的，所以在载波通道中不测固有衰耗。

（2）介入衰耗 b_j。

介入衰耗以当电源与负载直接连接时负载得到的功率 P'_2 与经四端网络连接时负载得到的功率 P_2 之比值取常用对数的 10 倍表示。

$$b_j = 10\lg\frac{P'_2}{P_2} \qquad (\text{dB}) \tag{3-304}$$

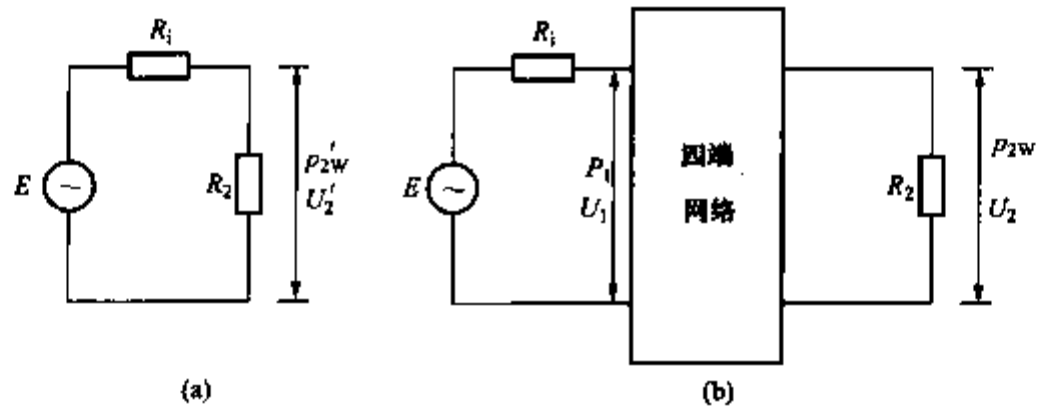


图 3－114 测量介入衰耗示意图

（a）不接四端网络；（b）接入四端网络

测量介入衰耗示意图如图 3－114 所示，测量时保持电源电压不变。用电平表或电压表分别测量不接四端网络时负载 R_2 上的功率绝对电平 p'_{2w}、电压 U'_2 和接入四端网络后负载 R_2 上的功率绝对电平 p_{2w}、电压 U_2。则用电平表法或电压表法计算介入衰耗的公式分别如

式（3－305）、式（3－306）所示：

$$b_j = 10\lg\frac{P'_2}{P_2} = p'_{2w} - p_{2w} \qquad (\text{dB}) \tag{3-305}$$

$$b_j = 10\lg\frac{P'_2}{P_2} = 10\lg\frac{U'^2_2/R_2}{U_2^2/R_2} = 10\lg\frac{U'^2_2}{U_2^2} = 20\lg\frac{U'_2}{U_2} \qquad (\text{dB}) \tag{3-306}$$

（3）工作衰耗 b_p。

当负载阻抗 R_2 与电源阻抗 R_i 相等并直接相连时，负载 R_2 上所接收的最大功率 P_0 与接入四端网络后负载 R_2 上所接收的功率 P_2 之比值取常用对数的 10 倍称作工作衰耗。

$$b_P = 10\lg\frac{P_0}{P_2} \tag{3-307}$$

测量工作衰耗的示意图如图 3－115 所示，负载阻抗为 R_L 且与电源阻抗 R_i 相等。用电平表和电压表测得接入四端网络后的（b）图中的电压绝对电平 p_{1v}，负载 R_L 上的电压绝对电平 p_{4v} 和电压 U_4。

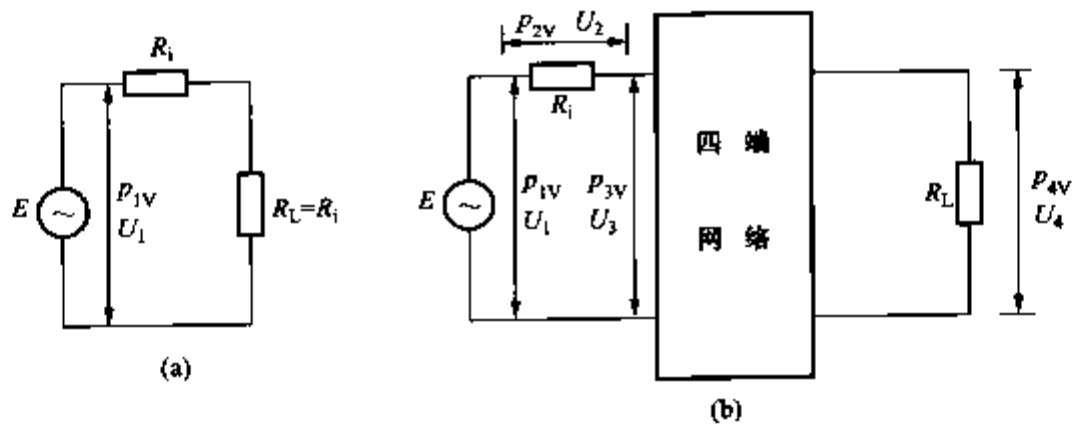


图 3－115 测量工作衰耗示意图

（a）负载与电源之间无四端网络；（b）负载与电源之间接入四端网络

在图 3－115（a）中由于负载阻抗 R_L 与电源阻抗 R_i 相等，因此负载 R_L 上的电压为 $E/2$，考虑到式中的 E 就是图中的 U_1，此电压即为 $U_1/2$。该串联电路中的电流为 $U_1/2R_i$。负载 R_L 上得到的功率为 $P_0 = U_1^2/4R_i$。在图 3－115（b）中根据电压表测得的负载 R_L 上的电压 U_4 可得知负载 R_L 上得到的功率为 $P_2 = U_4^2/R_L$。于是根据式（3－307）得到当用电压表法时工作衰耗的计算公式为：

$$b_p = 10\lg\frac{P_0}{P_2} = 10\lg\left(\frac{U_1^2}{U_4^2}\cdot\frac{R_L}{4R_i}\right) = 20\lg\frac{U_1}{U_4} + 10\lg\frac{R_L}{4R_i} \qquad (\text{dB}) \tag{3-308}$$

当 $R_L = R_i$ 时，上式成为：

$$b_p = 20\lg\frac{U_1}{U_4} - 10\lg4 = 20\lg\frac{U_1}{U_4} - 20\lg2 \qquad (\text{dB}) \tag{3-309}$$

当用电平表法时，在图 3－115（b）中测得电压绝对电平 p_{1v} 和负载 R_L 上的电压绝对电平 p_{4v}，再在式（3－308）中考虑到式（3－296）的关系后，工作衰耗的计算公式为：

$$b_p = 20\lg\frac{U_1}{U_4} + 10\lg\frac{R_L}{4R_i} = p_{1v} - p_{4v} + 10\lg\frac{R_L}{4R_i} \qquad (\text{dB}) \tag{3-310}$$

当 $R_L = R_i$ 时，上式成为：

$$b_p = p_{1v} - p_{4v} - 10\lg4 = p_{1v} - p_{4v} - 20\lg2 \qquad (\text{dB}) \tag{3-311}$$

高频电缆、输电线路、结合滤波器需要测试工作衰耗。结合滤波器测试时，把结合滤波

二、继电保护专用收发信机

继电保护专用收发信机都是单频制的，其发信频率与收信频率相同，所以只能与使用闭锁信号的纵联保护装置配合使用。

（一）继电保护专用收发信机的原理框图

继电保护专用收发信机的原理框图如图 3－127 所示。下面对各部分框图功能作一介绍。

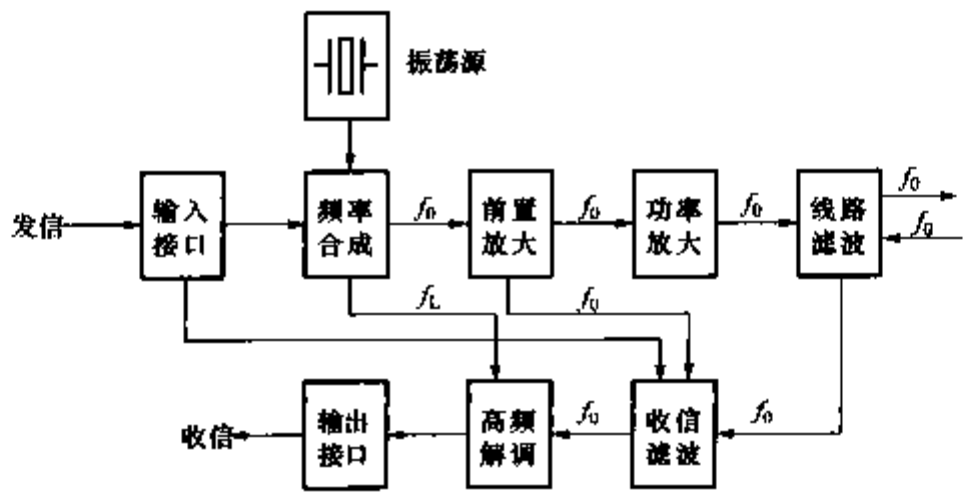


图 3－127 高频收发信机原理框图

1. 输入接口

将保护装置起动发信的接点作为本装置的开入量，经过输入接口变成电位信号。输入接口的输出一路去频率合成使收发信机发信，另一路去收信滤波的门控电路使收发信机不接受对端信号，仅接受本端从前置放大输出的 f_0 信号。当保护装置起动发信的接点闭合就起动本端收发信机发信，如果保护装置起动发信的接点断开，就不发信——也就是停信。

2. 振荡源

振荡源是一个用石英稳频的振荡器。该振荡器一直输出频率恒定的信号给频率合成器。利用石英晶体的压电效应使输出的振荡频率非常稳定。

3. 频率合成器

将振荡源输入的某一频率信号经过分频、频率合成，得到两个频率信号。一个是发信机的工作频率 f_0，另一个是本振频率 f_L。工作频率 f_0 按（42＋4n）kHz，（n＝0，1，…114）分级组合成 40～500kHz 中的某一个频率。本振频率 $f_L = f_M - f_0$。如果频率合成器收到输入接口来的高电平时，控制门开放将 f_0 信号输出到前置放大器；将 f_L 信号输出到高频解调器。

4. 前置放大器

前置放大器是一个电压放大电路，将 f_0 信号放大，以推动功放电路。经放大以后的 f_0 信号输出到功放电路，未经放大的 f_0 信号输出到收信滤波器。

5. 功放电路

将 f_0 信号功率放大到额定值，例如 10W/40dBm。一般采用 AB 类功率放大。

6. 线路滤波器

线路滤波器主要提供发信谐波抑制，线路阻抗匹配和同相并机的隔离能力。

7. 收信滤波器

由收信门控和高频带通滤波器构成。当本机发信时，通过收信门控电路使收信滤波器只接收来自本机前置放大的 f_0 信号，实现自发自收。当本机停信时通过收信门控电路使收信

1. 锁相环频率合成和加权式正弦信号合成技术

锁相环频率合成的原理框图如图 3－129 所示。

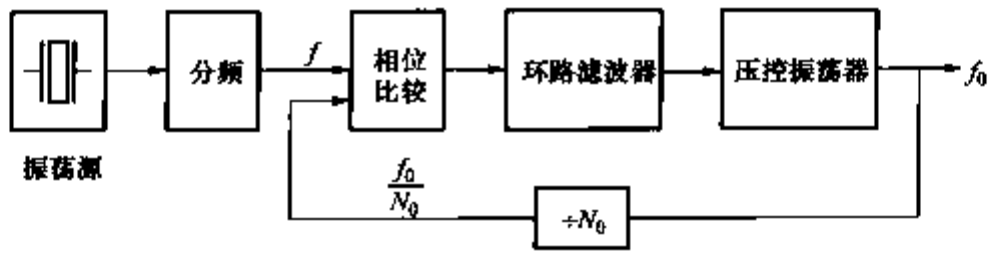


图 3－129 锁相环频率合成的原理框图

振荡源的振荡频率经过分频后得到 f 频率信号。f 频率信号与 f_0/N_0 频率信号进行相位比较，不同的相位输出不同的电压值。经过压控振荡器将不同的电压再转换成不同的频率信号输出。通过二进制计数器 N_0 的整定可得到需要的输出频率。锁相环频率合成器输出的信号是方波信号，所以还需要滤波，而频率可变的滤波器制造调试都比较麻烦。

加权式正弦信号合成方法是将锁相环频率合成器的输出方波，经过移位寄存器移位加权后，最后经过简单的滤波就可得到需要的正弦波。其原理如图 3－130 所示。

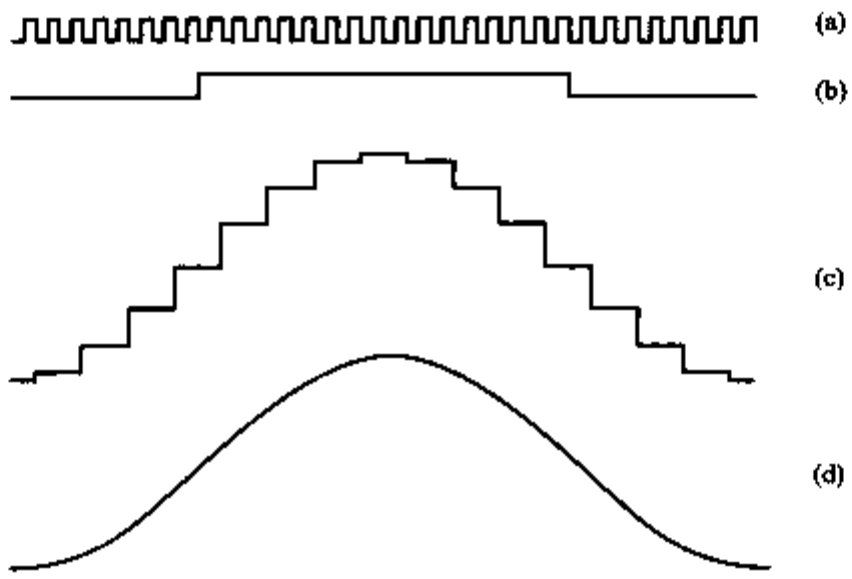


图 3－130 加权式正弦信号合成技术

两个锁相环频率合成器分别输出 f_0 和 $32f_0$ 两个频率的方波信号，如图 3－130（a）、（b）所示。$32f_0$ 的信号作为时钟信号。将 f_0 方波分成 16 段，每段通过不同的移位进行加权，得到图（c）所示的波形。这样经过简单的小电容滤波即可得到图（d）的正弦波形。

使用锁相环频率合成和加权式正弦信号合成的方法产生频率可调的正弦信号，与以前采用不同的石英晶体来改变不同的工作频率相比较前进了一大步。制造厂家可以批量生产，使用部门可以按照自己的需要改变频率。但这种方法与下面的直接数字频率合成技术（DDS）比较，电路还是较复杂、成本也较高。另外锁相环的稳定性不易保证，频率调整也不算十分方便。

2. 直接数字频率合成技术（DDS）

随着高频率的直接数字频率合成器（DDS）的出现，从一个芯片中就可以输出从很低的频率到几百兆赫兹的高精度正弦波信号。而这种直接数字频率合成器价格便宜，例如最高输出频率为 25MHz 的 AD9833 芯片制造厂家的售价仅为 3.95 美元（2007 年价）。

直接数字频率合成器（DDS）频率合成原理是近年来迅速发展起来的一种新的频率合成方法，其原理框图如图 3－131 所示。

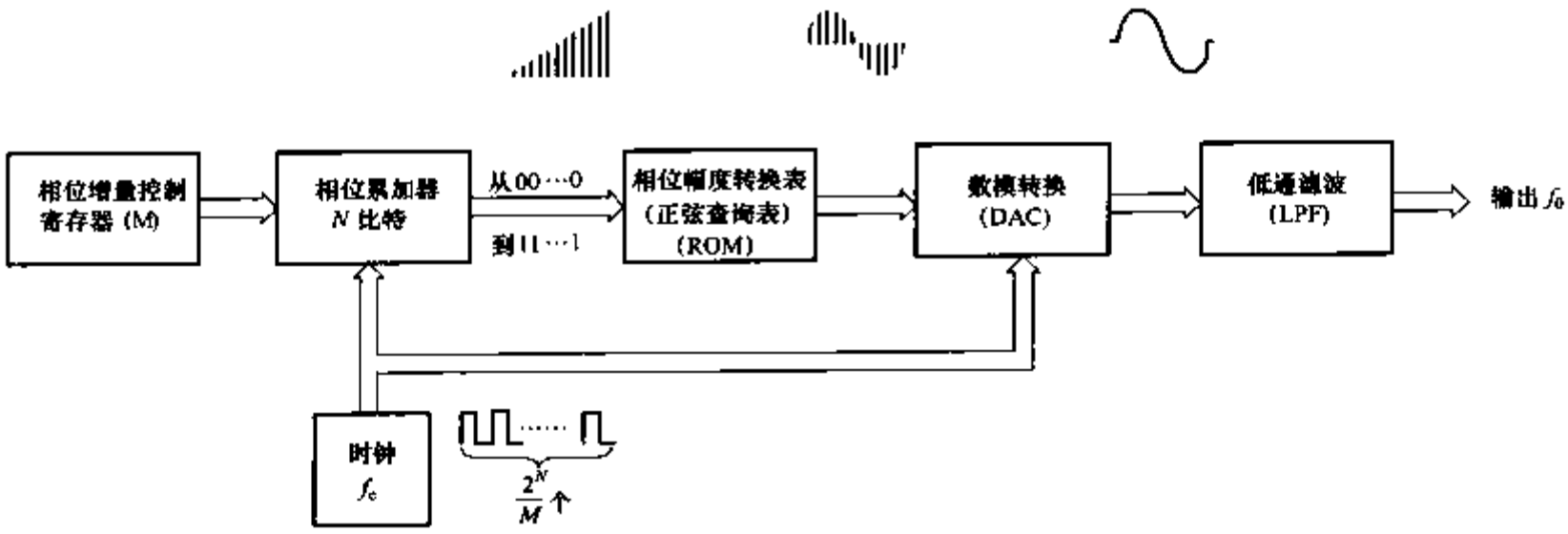


图 3－131　DDS 原理框图

直接数字频率合成器（DDS）应用了正弦信号相位连续的特点。它首先将一个周期的正弦信号在每一个相位点（对应每一个地址）的幅值所对应的数字量存放在正弦函数查询表 ROM 中。所以正弦查询表 ROM 中存储了一个周期的正弦波幅度的量化数据，表中的每个地址代表一个周期的正弦波的一个相位点，这个表相当于一个相位/振幅变换器。查找表的过程就相当于将相位累加器输出的相位信息映射成数字振幅信息的过程。相位累加器是 N 比特的模 2 加法器，相位累加器可在每一个时钟周期来临时将累加器里的数与相位增量控制寄存器中整定的相位增量 M 相加，相加后的值仍然放在累加器中。该累加器从最小的数00…0（对应数值为 0）到最大的数 11…1（对应数值为 2^N-1），总共的数值是 2^N。如果记数大于 2^N-1，则自动溢出，而只保留后面的 N 位数字于累加器中。累加器的输出值就作为正弦查询表的查找地址，从查询表中找到对应该点的幅值。实现从相位累加器输出的相位值到正弦幅度值的转换。这个数字振幅值就作为数模变换器 D/A 的输入，在数模转换器（D/A）中将正弦幅度值的数字量转变为模拟量，最后通过滤波器输出一个很纯净的正弦波信号 f_0。

如果相位增量控制寄存器中整定的相位增量 M 取为最小值 1 时，每 2^N 个时钟周期，相位累加器中的数从 00…0 变到 11…1，从正弦查询表中查得的是一个周期的幅度变化值，这样就输出一个周期的正弦波。于是可得到：

$$f_0 = \frac{f_C}{2^N} \tag{3-341}$$

式中：f_0 为输出信号的频率，f_C 为时钟频率，N 为累加器的位数。如果相位增量控制寄存器中整定的相位增量 M 整定为 2 时，每来个时钟周期，相位累加器就加 2。所以每 $2^N/2$ 个时钟周期，相位累加器中的数从 00…0 变到 11…1，从正弦查询表中查得的是一个周期的幅度变化值，就输出一个周期的正弦波。这样输出信号的频率 f_0 为：

$$f_0 = \frac{f_C}{2^N/2} = \frac{2f_C}{2^N} \tag{3-342}$$

作为一般的情况，如果相位增量控制寄存器中整定的相位增量为 M 时，则每 $2^N/M$ 个时钟周期输出一个周期的正弦波。所以输出信号的频率 f_0 为：

$$f_0 = \frac{f_C}{2^N/\mathrm{M}} = \frac{\mathrm{M}f_C}{2^N} \tag{3-343}$$

式（3－343）是 DDS 系统最基本的公式之一。累加器的位数 N 和时钟频率 f_C 确定后，

只要整定相位增量 M 的值就可调整输出信号的频率f_0。当 $M=1$ 时输出的频率f_0 为最小值（即分辨率）：

$$f_{0.\min}=\frac{f_C}{2^N} \tag{3-344}$$

当 $M=M_{\max}$时输出的频率f_0 为最大值：

$$f_0=\frac{M_{\max}f_C}{2^N} \tag{3-345}$$

此时从正弦查询表输出的每信号周期的最少点数为：

$$k=\frac{2^N}{M_{\max}} \tag{3-346}$$

当 N 比较大时，即使对于很大范围内的 M 值，DDS 系统都可以在一个周期内输出足够的点数，保证输出的波形是一个精确的正弦波，失真很小。

（三）新型收发信机还应该加强的一些功能

1. 抗干扰性能和抗雷电浪涌电流破坏的性能需要进一步加强

收发信机由于直接和一次通道相连，工作条件相对恶劣，比较容易受到雷击和干扰的影响。各个厂家每年都有由于雷击造成的收发信机损坏从而造成保护误动的事故发生。因此，提高收发信机抗雷击和抗干扰能力的需求非常迫切。

2. 提高事故分析能力

当保护发生误动或拒动时，用户往往需要分析造成事故的原因：是保护装置的问题还是通道或收发信机的问题。因此如果收发信机能提供更加详细的信息，有利于事故的分析。新型收发信机都用微机技术来实现，理应满足这些要求，这也是收发信机的发展趋势。收发信机应具有通道的详细录波和开关变位的详细录波功能，并应具有详细的事件报文记录的功能。

3. 操作应该更加方便

随着变电站综合自动化的发展，追求人性化、操作方便快捷已成为变电站二次设备发展的必然趋势。能够方便地看到装置内部的各个参数和状态信息将能给用户的运行和维护带来很大方便。

三、光纤通道与接口

随着光纤通信技术的快速发展，光纤通道作为继电保护通道得到了大量的应用。和其他通信方式相比，光纤通信有以下明显的优点：通信容量大；中继距离长；不受电磁干扰；资源丰富；重量轻；体积小等。所以在原国家电力公司制定的有关文件中就已明确提出应积极推广使用光纤通道作为纵联保护的通道方式。由于光纤通道的通信容量大，因此可以利用它构成输电线路的分相纵联保护，例如分相纵联电流差动保护、分相的纵联距离、方向保护等。目前如果采用专用光纤传输通道，传输距离已达到 120km。

光纤保护包括光纤电流差动保护、光纤距离保护、光纤方向保护、光纤命令传输等装置，它们对传输通道的要求是不同的。光纤距离保护、光纤方向保护和光纤命令传输装置由于传输的是逻辑命令信号，对传输通道的对称性没有要求。可以工作在任何传输通道，也完全可以工作在任何形式的光纤自愈环网中。

光纤电流差动保护传输的是电流的瞬时值以及电流相量的实部和虚部，在求动作电流和制动电流时应该是同一时间的两端电流的相量和和相量差，因此要求两端同步采样。这就要

光缆盘长的标称值为2km，所以根据需敷设的光缆总长度，中间有若干个接头需要熔接。光纤的连接不同于电线的连接，光纤的连接要考虑两根纤芯的几何位置。通常光纤有两种连接方式：熔接与机械连接。

熔接是用电弧同时熔化光纤的两个端面。用人工熔接仪熔接的叫人工熔接方式，仅用于多模光纤。而用自动熔接仪熔接的叫自动熔接方式，接头的衰耗可降到0.05～0.1dB。

机械连接就是用具有专门定位光纤机械连接器来连接光纤，一般继电保护用的光纤接口端机与外界敷设的光缆连接就采用这种方式．目前，我国较通用的连接器为FC型，其他类型的还有SC型、SMA型、ST型等，一般连接器的损耗为0.2～1dB左右。光纤连接器的特性见表3－7，光纤连接器的结构及安装如图3－135所示。

表3－7　　光纤连接器的性能

	多模连接器	单模连接器
插入损耗	≤0.3dB	≤0.5dB
重复性	≤±0.1dB	≤±0.2dB
光纤尺寸	50/125μm	(8～10)/125μm
使用寿命	>2000次插拔	>2000次插拔

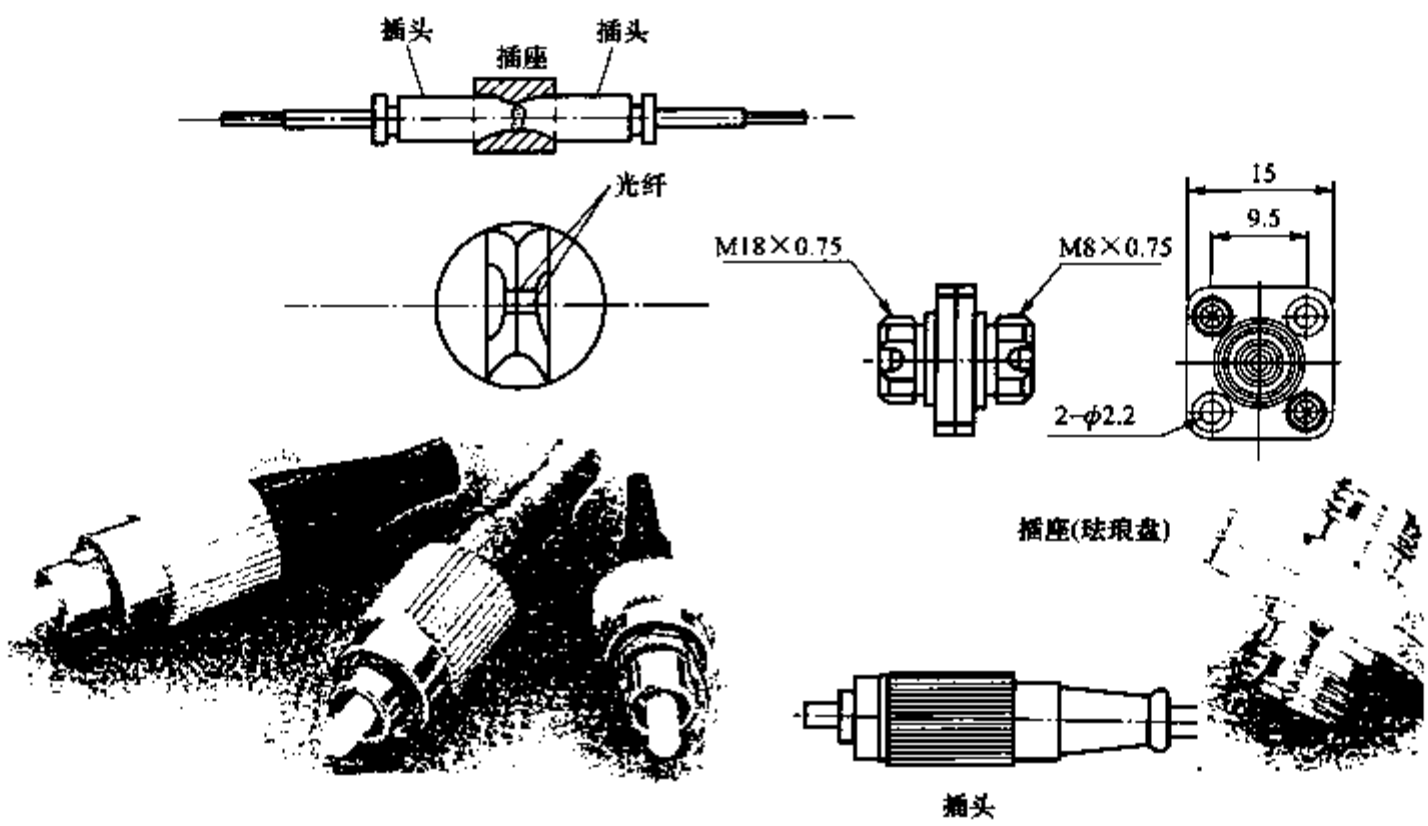


图3－135　光纤连接器的结构与安装

（二）光纤通信简介

光纤通信的发展历史虽然不长，但光纤通信的发展是非常迅猛的。1966年“光纤之父”高锟博士首次提出光纤通信的想法，1970年贝尔研究所研制出室温下可连续工作的半导体激光器，同年康宁公司制造出损耗为20dB/km光纤。1977年芝加哥第一条45Mbit/s的商用线路投入运行后，光纤通信的发展趋势愈加迅速。目前电力系统中主要运行的光纤通信设备的速率有622Mbit/s和2.5Gbit/s两种，而现在商用系统中速率已达到10Gbit/s。大容量、超高速是光纤通信的发展方向。

1．光纤通信器件

在光纤通信系统中，必须要有光/电、电/光的能量转换器件。在发送端需将电信号变成

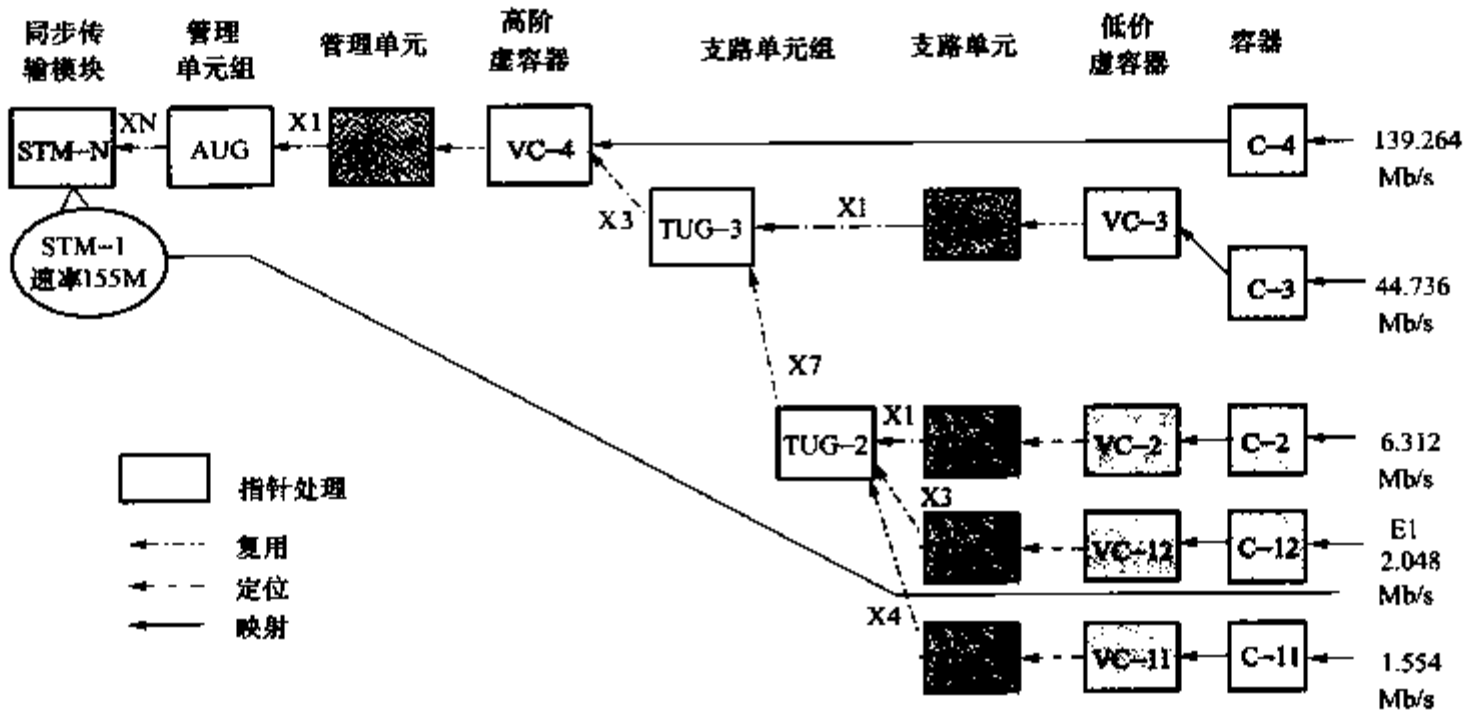
体系。SDH 传输网具有智能化的路由配置能力，上下电路方便，维护、监控、管理功能强，光接口标准统一等优点，SDH 传输技术体系的出现是光纤通信传输网技术的一次革命，是现阶段信息高速公路的主干道。

SDH 传输系统的特点是采用了世界上统一的标准传输速率等级。最基本的模块称为 STM－1，传输速率为 155.520Mbit/s。SDH 各网元的光接口有严格的标准规范，有利于建立统一的通信网络。在帧结构中安排了丰富的开销比特，便于网络的运行、维护和管理。采用数字同步复用技术，简化了复接分接的实现设备，十分简便。采用数字交叉连接设备 DXC 可以对各端口速率进行可控的连接配置，对网络资源进行自动化的调度和管理，提高了网络的灵活性及对各种业务变化的适应能力。

由于目前大多数 SDH 设备只提供 E1（2048kb/s）速率的业务接口，继电保护及其他电力系统的业务也只能通过该接口连接到通信网中。对于速率更低的业务，通过在 E1 接口上外挂 PCM 设备，可以提供 64kb/s 的业务和其他低速业务，相应的通信系统更显复杂。

1）SDH 传输系统的通信复接。

图 3－141 表示出了用 SDH 传输系统时的通信复接图。图中 C 为容器，完成适配功能，目前规定了五种标准：C－11、C－12、C－2、C－3、C－4，其中 C－12 为 2.048Mbit/s，提供了 E1（2.048Mbit/s）速率的业务接口。VC 为虚容器，由标准容器出来的数字流加上通道开销后就构成了所谓的虚容器，由信息净负荷和通道开销（POH）组成，每 125μS 重复一次。其包封速率与网络同步，因而不同包封是互相同步的，VC 是 SDH 中最重要的一种信息结构，VC 在 SDH 网络中传输时总是保持完整不变，因而可以作为一个独立的实体从通道任一点取出或插入，进行同步复用和交叉连接处理。TU 是支路单元，是在低阶通道层和高阶通道的适配的信息结构。TU－N 由 VC－N 与 TU 指针组成。TUG 是支路单元组，由规定的数个 TU 组成 TUG。AU 为管理单元，是在高阶通道和复用层之间提供适配的信息结构，由高阶 VC 和 AU 指针构成。指针用来指明 VC 在 STM－N 帧结构中的位置。AUG 为管理单元组，由多个 AU 组成。



映射：将各支路适配进相应的 VC 中称映射；

复用：将多个低阶通道层信号适配到高阶通道层或将多个高阶通道适配进复接段称复用；

定位：将 VC 放进支路单元或管量单元，同时将其与传送它的实体（TU 或 AU）帧参考的偏差也作为信息结合进去的过程为定位。帧偏差指示为指针 PTR。

图 3－141　通信复接图

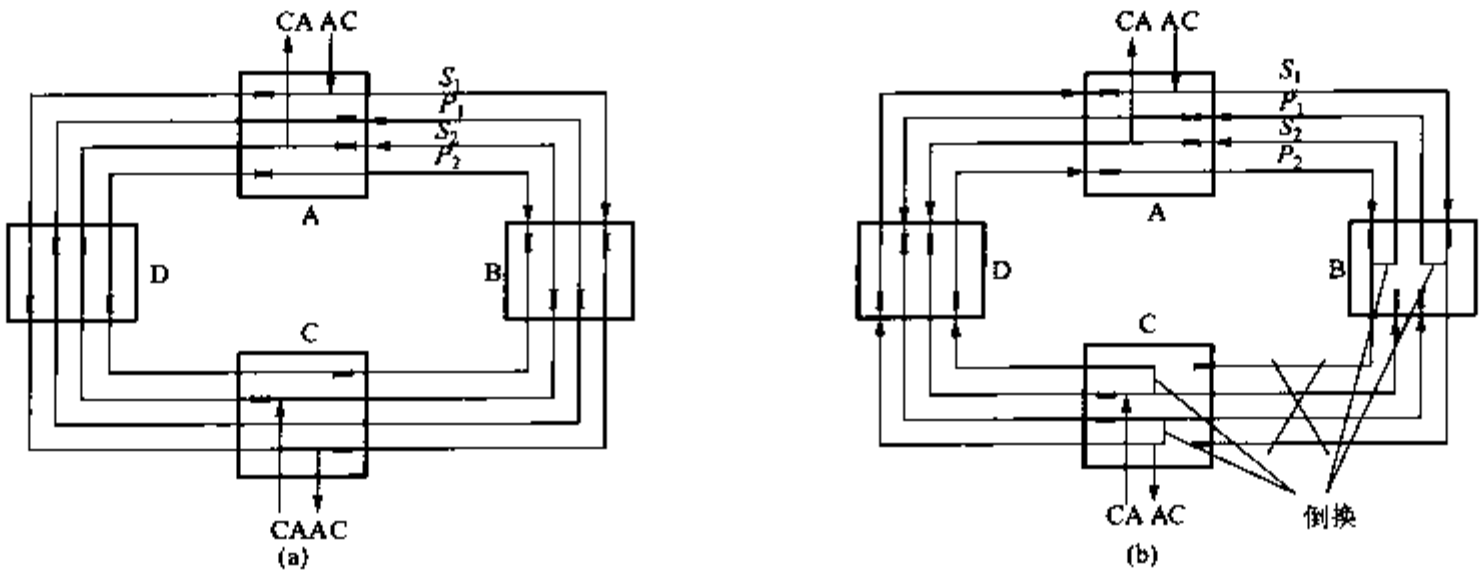


图 3－147　四纤双向复用段倒换环

（a）倒换前；（b）倒换后

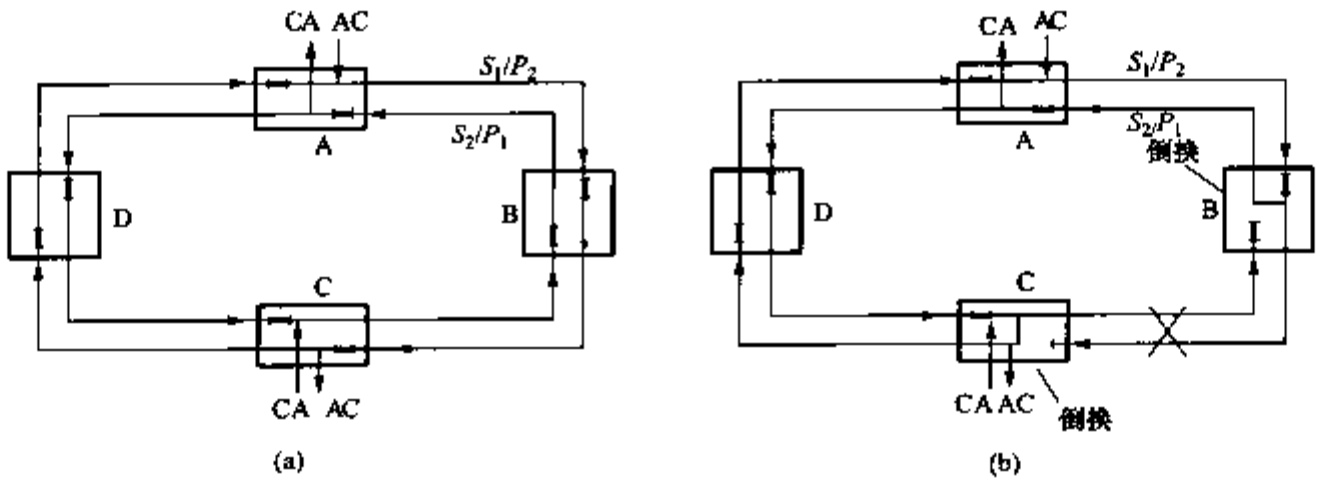


图 3－148　二纤双向复用段倒换环

（a）倒换前；（b）倒换后

共用一根光纤。同理 S_2 与 P_1 公用一根光纤。S_1/P_2 光纤中的保护信号必要时可传输 S_2/P_1 中的业务信号，S_2/P_1 光纤中的保护信号必要时也可传输 S_1/P_2 中的业务信号。这样四根光纤可以简化为两根光纤。下面以 A 节点与 C 节点间发、收信号为例说明其工作情况。图（a）是倒换前正常状态，A→C 的信号，从 A 节点出发，由 S_1/P_2 光纤经 B 节点到达 C 节点；C→A 的信号从 C 节点出发，由 S_2/P_1 光纤经 B 节点到达 A 节点。图（b）表达了当 BC 节点间的光缆被切断，两根光纤同时中断时 B、C 两站倒换开关的切换情况，B、C 节点中的倒换开关将 S_1/P_2 光纤与 S_2/P_1 光纤沟通。这样 A→C 的信号，从 A 节点出发由 S_1/P_2 光纤经 B 节点的倒换开关再由 S_2/P_1 光纤逆时针传输，经 A、D 节点到达 C 节点。C→A 的信号，从 C 节点出发经 C 节点的倒换开关由 S_1/P_2 光纤经 D、A 节点到达 B 节点，再经 B 节点的倒换开关由 S_2/P_1 光纤传送到 A 节点。

在本章第三节的光纤电流差动保护原理中曾经谈到同步采样问题。目前各厂家普遍采用采样时刻调整法。该方法要求主机与从机之间收发的通道传输延时应该相等，这要求通道收发的路由应相同。表 3－11 列出了上述几种自愈环网结构在正常运行和通道故障倒换后的收发路由的变化情况。从表中可见在二纤单向通道倒换环、二纤双向通道倒换环和二纤单向复用段倒换环的结构中都会出现收发路由不一致的情况。而二纤双向复用段倒换环的结构，虽然通信路由会发生变化，但切换前和切换后，收发路由仍然能保持一致，理论上可以在继电

[General Information]
书名=国家电网公司继电保护培训教材　上
丛书名=
作者=国家电力调度通信中心编著
出版社=中国电力出版社
出版日期=２００９．０４
形态项=　３８７
页数=３８７
原书定价=　１５０．００（上、下册）
读秀号=０００００７４５１５３９
ＳＳ号=１２２１０３２０
ＩＳＢＮ=　９７８-７-５０８３-８３８９-７　/　ＴＭ７７
分类号=１８１５０９０７
主题词=
参考文献格式=国家电力调度通信中心编著．国家电网公司继电保护培训教材　上．中国电力出版社，２００９．０４．
简介=

封面
书名
版权
前言
目录
上册
第一章　专业基础理论
第一节　单相交流电路分析与计算
一、正弦交流电的基本概念
二、正弦交流电的相量表示法
三、单一元件的交流电路
四、Ｒ１Ｃ串并联交流电路
五、变流电路的功率及功率因数的提高
第二节　三相交流电路分析与计算
一、对称三相变流电源
二、三相交流电源的连接
三、三相交流电路分析
第三节　非正弦周期电流电路
一、非正弦周期信号
二、非正弦周期函数的分解
三、非正弦周期量的有效值、平均值及电路的平均功率
四、对称三相电路中的高次谐波
第四节　线性动态电路的时域分析
一、换路定律及初始值计算
二、ＲＣ串联电路的过渡过程
三、Ｒ１串联电路的过渡过程
四、一阶电路的三要素法
五、Ｒ１串联电路的正弦响应
第五节　电磁与磁路分析计算
一、磁场及基本物理量
二、铁磁物质的磁化
三、磁路及磁路定律
四、交流铁芯线圈
第六节　微机保护基础
一、简单逻辑元件介绍
二、微机保护装置硬件系统
三、微机保护算法介绍
第二章　电力系统运行及故障分析
第一节　电力系统正常运行时的电压、电流及功率传输
一、正常运行时的电流、Ｋ点电压
二、功率传输
三、电压降落与电压损失
四、传输功率与电流、电压间的相量关系
五、测量阻抗
第二节　标幺制
一、标幺值
二、三相系统基准值选取
三、三相系统中标幺值计算特点
第三节　对称分量法应用
第四节　电力系统各元件序阻抗及其相应等值电路
一、同步发电机
二、变压器
三、输电线路
四、电抗器
五、异步电动机

六、综合负荷
第五节　电力系统横向短路故障分析
一、三相短路故障分析
二、两相短路故障分析
三、单相接地故障分析
四、两相接地短路故障分析
五、正序等效定则
第六节　三绕组自耦变压器接地中性点电流
一、自耦变电器中压侧接地故障
二、自耦变压器高压侧接地故障
第七节　电力系统纵向不对称故障分析
一、单相断线分析
二、两相断线分析
第八节　不对称短路故障时ＹＮ，ｄ接线变压器两侧电流、电压关系
一、基本概念
二、ＹＮ，ｄ１１接线变压器ｄ侧ａｂ相短路
三、ＹＮ侧Ｂ相接地短路
四、ＹＮ侧ＡＣ相短路
第九节　电力系统稳定和电力系统振荡
一、电力系统稳定概念
二、提高电力系统暂态稳定水平的主要措施
三、电力系统振荡时电气量特点
第三章　输电线路保护及重台闸
第一节　零序电流方向保护
一、零序电流方向保护的基本原理
二、零序方向继电器的原理、实现方法、性能评述
三、零序方向继电器在非全相运行期间和在有串联补偿电容线路上的动作行为分析
四、零序电流和零序电压的获取
第二节　距离保护
一、距离保护的作用原理和时限特性
二、短路时保护安装处电压计算的一般套式及阻抗继电器的接线方式
三、过渡电阻产生的附加阻抗及对阻抗继电器工作的影响
四、阻抗继电器的工作电压
五、阻抗继电器的动作方程和动作特性
六、以正序电压为极化电压的阻抗继电器
七、方向阻抗继电器的暂态动作特性
八、工频变化量的阻抗继电器
九、分支电流助增电流和外汲电流对阻抗继电器工作的影响
十、交流失压对距离保护工作的影响以及断线闭锁原理
十一、系统振荡对距离保护的影响及振藩闭锁原理
十二、ＹＮ，ｄ１１接线变压器三角侧短路，星侧阻抗继电器的测量阻抗
十三、阻抗继电器在有串联补偿电容线路上发生短路时的动作行为分析及其对策
第三节　纵联保护
一、概述
二、闭锁式纵联方向保护
三、闭锁式纵联距离保护
四、超范围与欠范围允许式的纵联保护
五、光纤纵联电流差动保护
六、工频变化量方向继电器
七、基于暂态分量的能量积分方向元件
八、平行线路线间互感对纵联零序方向保护的影响
第四节　自功重合闸
一、自动重合闸的作用及应用
二、自动重合闸方式及动作过程

三、自动重合闸的起动方式
四、自动重合闸动作时间整定中应考虑的问题
五、双侧电源线路三相跳闸后的重合闸检查条件
六、重合闸的前加速和后加速
七、重合闸的充电与闭锁
八、３／２接线方式对重合闸和断路器失灵保护的要求
九、２２０　ｋＶ及以上电压等级同杆并架双回线路的按相自动重合闸方式
第五节　选相元件
一、概述
二、两相电流差突变量选相元件
三、工作电压突变量选相元件
四、比较零序电流与Ａ相负序电流的相位结合阻抗元件动作行为的选相元件
五、低电压选相元件
第六节　过电压保护及远方跳闸保护装置
一、概述
二、超高压远距离输电线路产生过电压的机理
三、工额过电压保护和过电压起动远跳
四、远方跳闸保护装置
第七节　继电保护通道
一、纵联保护的载波通道及高频通道衰耗简介
二、继电保护专用收发信机
三、光纤通道与接口
参考文献