

利用故障录波量计算线路故障点

黑龙江省西部电力网调度局 姚长华

输电线路故障点的查找,是一项很艰苦的工作。由保护装置动作情况对故障点所作的粗略判断往往范围很大,因而查找故障点不仅要花费很多劳动力,而且寻找故障点时间较长,使故障抢修恢复送电时间大大拖长,增加了负荷损失,将给工农业生产造成更大的影响。

近年来,许继生产的PGL—1S型成套录波器屏大量投用,特别是许继、阿继及上继生产的PGL—1型故障录波屏,即将在电力系统中广泛应用,使电网故障录波装置逐步完善和加强,为迅速而准确的判断线路故障点创造了有利条件。

本文试图对输电线路各种类型的故障,根据故障种类和线路特点,利用故障录波量计算故障点位置,为准确判断故障距离提供依据,从而可大大的缩小巡线范围,减少查找故障点的工作量。

实践表明,只要线路阻抗参数及录波片所提供的电流、电压量数据准确,那么通过计算得到的故障点位置的精度,也是令人满意的。当线路较短,弧光电阻较大时,单电源单回线某些计算故障点的公式在计算精度上要受到些影响,如果所用的故障量在短路最初一段时间内测取(例如0.1秒以前),此时短路点电弧尚未拉长,弧光电阻较小,会使故障距离计算误差减少。使用受弧光电阻影响的公式计算出的 l 值,应作为故障点距离的上限值。

为计算方便,文中的算式是以标么值为基础进行计算的,线路阻抗参数要使用某基量下的标么值电抗(或阻抗)。录波量所给出的具名值电气量,对大部分公式可用一次或二次电流电压值直接代入计算,特殊情况须将具名值归算到标么值后再进行计算。

本文中所给出的计算故障点的公式,都是以大电流接地系统的等值回路为基础导出的,对于小电流接地系统的线路,相间短路点的计算公式是可用的。

为简单计,公式求导过程力求简化,并略去电气量的标么符号,只在结论式中对使用标么值者加上符号“*”并作适当说明。

由于技术理论水平所限,文中疏误之处一定不少,请阅者不吝指正。

本文初稿蒙业师刘骏云、胡经民二位工程师详细校阅并予以指导,在此谨致以衷心的感谢。

一、录波量标么值计算

1. 电压标么值计算

电压基准量可使用相间标称电压,也可用相间平均电压,当取用相间平均电压为基准电压时:220千伏线路 $U_B = 230$ 千伏,110千伏线路 $U_B = 115$ 千伏。后面导出的计算公式,因使用了阻抗的标么值,所以运行电压与所用平均电压的数字差别不会影响计算精度。

计算公式中: U_ϕ —相电压, $U_{\phi(2)}$ —相电压二次值; $U_{\phi-\phi}$ —相间电压; $U_{\phi-\phi(2)}$ —相间电压二次值; $U_{2\phi}$ —负序相电压; $U_{2\phi(2)}$ —负序相电压二次值; $U_{1\phi}$ —正序相电压; $U_{1\phi(2)}$ —正序相电压二次值; U_0 —另序电压; $U_{0(2)}$ —另序电压二次值;

设220千伏和110千伏电压互感器变比为: $\frac{220}{\sqrt{3}} \left| \frac{0.1}{\sqrt{3}} \right| 0.1^{KV}$ 和 $\frac{110}{\sqrt{3}} \left| \frac{0.1}{\sqrt{3}} \right| 0.1^{KV}$;

结线为 $\Lambda/\Lambda/\Delta$,那么电压互感器 Λ 侧二次基准相电压 $U_{B\phi(Y)} = \frac{105}{\sqrt{3}} = 60.6^V$, Λ 侧二次基准相间电压 $U_{B\phi-\phi(Y)} = 105^V$, Δ 侧基准相电压 $U_{B\phi(\Delta)} = 105^V$ 。

$$U_{\phi(2)} \text{的标么值电压 } U_{\phi*} = \frac{U_{\phi(2)}}{U_{B\phi(Y)}} = \frac{U_{\phi(2)}}{60.6} \dots\dots\dots(1-1)$$

$$U_{\phi-\phi(2)} \text{的标么值电压 } U_{\phi-\phi*} = \frac{U_{\phi-\phi(2)}}{U_{B\phi-\phi(Y)}} = \frac{U_{\phi-\phi(2)}}{105} \dots\dots\dots(1-2)$$

$U_{\phi*}$ 和 $U_{\phi-\phi*}$ 在数值上与对应 $U_{\phi(2)}$ 和 $U_{\phi-\phi(2)}$ 的一次电压标么值相等。

正序及负序电压根据所用电压滤波器的型式,采用实际变换系数求出正序、负序相电压 $U_{1\phi(2)}$ 及 $U_{2\phi(2)}$,再利用(1-1)式求出其标么值。正、负序电压要取用稳态情况下的数值,避免由于阻容滤波器暂态过渡过程影响数值的准确性。

$$U_{0(2)} \text{的标么值电压 } U_{0*} = \frac{U_{0(2)}}{U_{B\phi(\Delta)}} = \frac{U_{0(2)}}{105} \dots\dots\dots(1-3)$$

U_{0*} 在数值上与对应 $U_{0(2)}$ 的一次另序电压的标么值相等。

在公式导出和计算中相电势的标么值取为1。

2. 电流标么值计算

设某基准容量下的标么电流基准量为 I_B ,由录波片测得的相电流二次值 $I_{\phi(2)}$ 、正序相电流二次值 $I_{1\phi(2)}$ 、负序相电流二次值 $I_{2\phi(2)}$ 及另序电流二次值 $I_{0(2)}$ 的一次电流标么值由下式计算:

$$I_* = \frac{I_{(2)} \cdot \Pi_T}{I_B} \dots\dots\dots(1-4)$$

Π_T : 变流器变比

故障点计算式中的 l 值,对单电源线路系指故障点距电源侧母线距离占线路总长度的百分数;对双电源线路系指故障点距 M 侧母线距离占线路总长度的百分数。如果 l 已算出,则故障点距电源侧母线(或 M 侧母线)距离为:

$$L_K = l \cdot L \quad L: \text{故障线路全长}$$

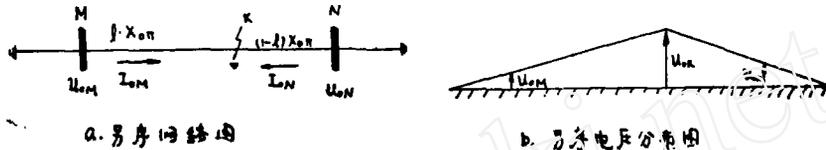
二、双电源单回线路的接地短路

双电源单回线的接地短路,对应故障点另序电压 U_{0K} ,列出的另序电压降方程(见图一)为:

$$U_{0K} = U_{0M} + I_{0M} \cdot l \cdot X_{0\text{JI}} = U_{0N} + (1-l) \cdot I_{0N} \cdot X_{0\text{JI}}$$

$$l \cdot (I_{0M} + I_{0N}) \cdot X_{0\text{JI}} = I_{0N} \cdot X_{0\text{JI}} + U_{0N} - U_{0M}$$

$$\text{解出 } l = \frac{I_{0N}}{I_{0M} + I_{0N}} + \frac{U_{0N} - U_{0M}}{(I_{0M} + I_{0N}) \cdot X_{0\text{JI}}} \dots \dots (2-1)$$



图一 双电源单回线接地短路

(2-1)式右侧前项可用一次电流具名值计算,若两侧变流器变比相同时,则该项可直接用另序电流二次值计算。当两侧电流、电压互感器变比相同,则(2-1)式可用另序电流(或三倍另序电流)、另序电压(或三倍另序电压)二次具名值表示为:

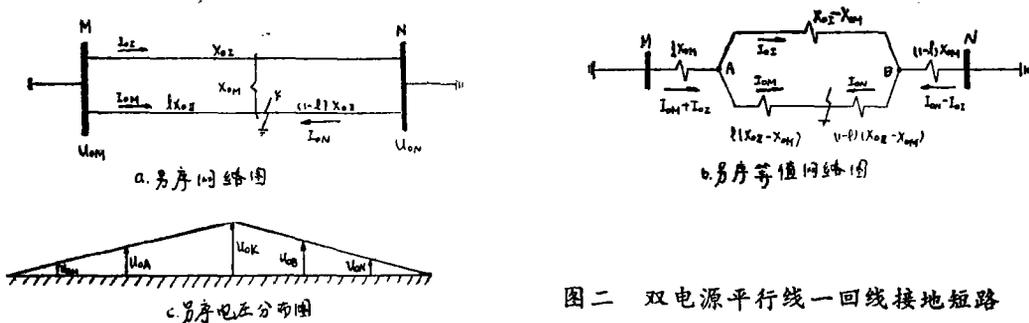
$$l = \frac{I_{0N(2)}}{I_{0M(2)} + I_{0N(2)}} + \frac{U_{0N(2)} - U_{0M(2)}}{\frac{U_{B\phi(\Delta)}}{(I_{0M(2)} + I_{0N(2)}) \cdot \Pi_T \cdot X_{0\text{JI}}}} \cdot \frac{1}{K}$$

$$= \frac{I_{0N(2)}}{I_{0M(2)} + I_{0N(2)}} + \frac{U_{0N(2)} - U_{0M(2)}}{(I_{0M(2)} + I_{0N(2)}) \cdot X_{0\text{JI}}} \times \frac{1}{K} \dots \dots (2-2)$$

其中:变比及标么值换算系数 $K = \frac{U_{B\phi(\Delta)} \cdot \Pi_T}{I_B} \dots \dots (2-3)$

因单相与两相接地故障的另序等值网络相同,所以(2-1)、(2-2)两式对两种接地故障都是适用的。

三、双电源平行双回线的接地短路



图二 双电源平行线一回线接地短路

1. 双回线运行时其中一回线的接地故障

图二中另序等值网络的求导见“电力系统继电保护”一书上册第328页。

由图二可知，双电源平行线一回线接地故障时，对应故障点另序电压 U_{0K} ，所列出的另序电压降方程式为：

$$\begin{aligned} U_{0K} &= U_{0M} + l \cdot (I_{0M} + I_{0I}) \cdot X_{0M} + l \cdot I_{0M} \cdot (X_{0I} - X_{0M}) \\ &= U_{0N} + (1-l) \cdot (I_{0N} - I_{0I}) \cdot X_{0M} + (1-l) \cdot I_{0N} \cdot (X_{0I} - X_{0M}) \\ l \cdot (I_{0M} + I_{0N}) \cdot X_{0I} &= U_{0N} - U_{0M} - I_{0I} \cdot X_{0M} + I_{0N} \cdot X_{0I} \dots\dots (3-1) \end{aligned}$$

设AB两点间另序电压为 U_{0AB} 则有：

$$\begin{aligned} U_{0AB} &= I_{0I} \cdot (X_{0I} - X_{0M}) = l \cdot I_{0M} \cdot (X_{0I} - X_{0M}) - (1-l) \cdot I_{0N} \cdot (X_{0I} - X_{0M}) \\ I_{0I} &= \frac{l \cdot (I_{0M} + I_{0N}) \cdot (X_{0I} - X_{0M}) - I_{0N} \cdot (X_{0I} - X_{0M})}{X_{0I} - X_{0M}} \end{aligned}$$

将非故障线路另序电流 I_{0I} 代入(3-1)式可得：

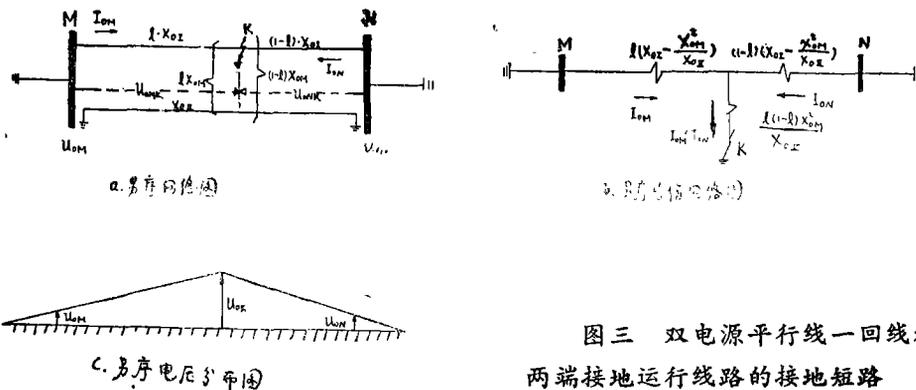
$$l \cdot (I_{0M} + I_{0N}) \cdot X_{0I} = U_{0N} - U_{0M} - \frac{X_{0M} [l \cdot (I_{0M} + I_{0N}) \cdot (X_{0I} - X_{0M}) - I_{0N} (X_{0I} - X_{0M})]}{X_{0I} - X_{0M}}$$

$$\begin{aligned} \text{解出 } l &= \frac{I_{0N} \cdot \frac{X_{0I} \cdot X_{0I} - X_{0M}^2}{X_{0I} - X_{0M}}}{(I_{0M} + I_{0N}) \cdot \frac{X_{0I} \cdot X_{0M} - X_{0M}^2}{X_{0I} - X_{0M}}} + \frac{U_{0N} - U_{0M}}{(I_{0M} + I_{0N}) \cdot \frac{X_{0I} \cdot X_{0I} - X_{0M}^2}{X_{0I} - X_{0M}}} \\ &= \frac{I_{0N}}{I_{0M} + I_{0N}} + \frac{U_{0N*} - U_{0M*}}{(I_{0M*} + I_{0N*}) \cdot \frac{X_{0I*} \cdot X_{0I*} - X_{0M*}^2}{X_{0I*} - X_{0M*}}} \dots\dots (3-2) \end{aligned}$$

当两回线另序阻抗 $X_{0I} = X_{0II} = X_{0JI}$ 时：

$$l = \frac{I_{0N}}{I_{0M} + I_{0N}} + \frac{U_{0N*} + U_{0M*}}{(I_{0M*} + I_{0N*}) \cdot (X_{0JI*} + X_{0M*})} \dots\dots (3-3)$$

2. 双回线路一回线检修且两端接地运行线路的接地故障



图三 双电源平行线一回线检修且两端接地运行线路的接地短路

由图三可以看出，对应故障点另序电压 U_{0K} ，可列出如下另序电压降方程式：

$$U_{0K} = U_{0M} + l \cdot I_{0M} \cdot \left(X_{0I} - \frac{X_{0M}^2}{X_{0I}} \right) = U_{0N} + (1-l) \cdot I_{0N} \cdot \left(X_{0I} - \frac{X_{0M}^2}{X_{0I}} \right)$$

$$\text{解出 } I = \frac{I_{0N}}{I_{0M} + I_{0N}} + \frac{U_{0N*} - U_{0M*}}{(I_{0M*} + I_{0N*}) \cdot \left(X_{0I*} - \frac{X_{0M*}^2}{X_{0I*}} \right)} \dots\dots\dots (3-4)$$

当两回线另序阻抗 $X_{0I} = X_{0II} = X_{0II}$ 时

$$I = \frac{I_{0N}}{I_{0M} + I_{0N}} + \frac{(U_{0N*} - U_{0M*}) \cdot X_{0II*}}{(I_{0M*} + I_{0N*}) \cdot (X_{0II*}^2 - X_{0M*}^2)} \dots\dots\dots (3-5)$$

将 (3-2)、(3-3)、(3-4)、(3-5) 四式与 (2-1) 式相比较, 不难看出 I 的表达式有些类同, 不同点只是在双回线时用 $\frac{X_{0I*} \cdot X_{0II*} - X_{0M*}^2}{X_{0I*} - X_{0M*}}$ 或 $(X_{0II*} + X_{0M*})$ 取代单回线另序阻抗 X_{0II*} , 在双回线另一回线检修接地时用 $(X_{0I*} - \frac{X_{0M*}^2}{X_{0I*}})$ 或 $\frac{X_{0II*}^2 - X_{0M*}^2}{X_{0II*}}$ 取代单回线另序阻抗 X_{0II*} 罢了。所以在双回线两侧电流、电压互感器变比和结线均相同的情况下, 可仿照 (2-2) 式办法在引入 K 值后, 将 (3-2) ~ (3-5) 诸式用另序电流、电压的二次具名值来表示。

与 (2-1) 式相同, (3-2) ~ (3-5) 式对单相和两相接地短路故障都是适用的。

进一步分析 (3-3) 及 (3-5) 两式可以看出, 在两线路另序互感抗 $X_{0M} = 0$ 时, 两式与 (2-1) 式完全相同, 所以当环形线路或另有侧路的线路接地故障时 (此时 $X_{0M} = 0$), 可使用 (2-1) 式计算故障点。

需要说明 (2-1) ~ (3-5) 各算式, 只适用于两侧均装有录波器的线路接地故障点的计算。

四、单电源单回线路的接地短路

1. 无电源侧变压器不接地的单相接地故障



图四 单电源无电源侧变压器不接地单回路单相接地短路

用标么值表示的单相接地短路时另序电流表达式为:

$$I_0 = \frac{1}{2 \cdot (X_{1c} + l \cdot X_{1II}) + (X_{0c} + l \cdot X_{0II})}$$

$$\text{解出 } I = \frac{1}{I_0} = \frac{2 \cdot X_{1c} + X_{0c}}{2 \cdot X_{1II} + X_{0II}}$$

$$\text{因为: } I_{2\phi} = I_0; \quad X_{1c} = \frac{U_{2\phi}}{I_0}; \quad X_{0c} = \frac{U_0}{I_0}$$

$$\text{所以 } I = \frac{1 - 2 \cdot U_{2\phi}^* - U_0^*}{I_0^* (2X_{1\pi} + X_{0\pi})} \dots\dots\dots (4-1)$$

若用电流、电压二次具名值表示时(4-1)式变为:

$$I = \frac{105 - 3.464 \cdot U_{2\phi(2)} - U_{0(2)}}{U_{B\phi(\Delta)}} \cdot \frac{I_0(2) \cdot \Pi_T}{I_B} \cdot (2X_{1\pi} + X_{0\pi})$$

$$= \frac{105 - 3.464 \cdot U_{2\phi(2)} - U_{0(2)}}{I_0(2) \cdot (2 \cdot X_{1\pi} + X_{0\pi})} \times \frac{1}{K} \dots\dots\dots (4-2)$$

当取线路的 $X_{0\pi} = 3 \cdot X_{1\pi}$ 代入,其中: K 值的意义与数值和(2-3)式相同。(4-1)和(4-2)两式将得出较简单些的结果来。

2. 无电源侧变压器不接地的两相接地故障

参见图四,用标么值表示的两相接地短路时,另序电流表达式为:

$$I_0 = \frac{1}{(X_{1c} + I \cdot X_{1\pi}) + 2(X_{0c} + I \cdot X_{0\pi})}$$

解出 $I = \frac{\frac{1}{I_0} - X_{1c} - 2 \cdot X_{0c}}{X_{1\pi} + 2X_{0\pi}}$

因为: $X_{1c} = \frac{U_{2\phi}}{I_{2\phi}}$; $X_{0c} = \frac{U_0}{I_0}$

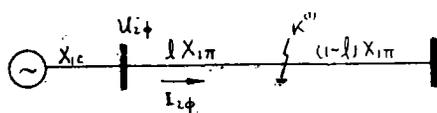
$$\text{所以 } I = \frac{1 - \frac{I_0^*}{I_{2\phi}^*} \cdot U_{2\phi}^* - 2U_0^*}{I_0^* (X_{1\pi} + 2 \cdot X_{0\pi})} \dots\dots\dots (4-3)$$

若用电流、电压二次具名值表示时(4-3)式变为:

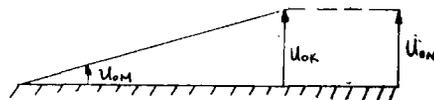
$$I = \frac{105 - \frac{\sqrt{3} I_0(2)}{I_{2\phi(2)}} \cdot U_{2\phi(2)} - 2U_{0(2)}}{I_0(2) \cdot (X_{1\pi} + 2X_{0\pi})} \times \frac{1}{K} \dots\dots\dots (4-4)$$

当取线路的 $X_{0\pi} = 3X_{1\pi}$ 代入(4-3)和(4-4)两式,同样也可以使公式简化些。

3. 两侧装有录波器的线路,无电源侧变压器不接地的线路接地故障



a. 正序网络图



b. 电压分布图

图五 单电源无电源侧变压器不接地单回线接地短路

接地短路时,因 $(1-l) \cdot X_{0\pi}$ 段线路无另序电流流过,所以故障点另序电压与N母线的另序电压相等,由此可得:

$$U_{0K} = U_{0N} = I_0 (X_{0C} + l \cdot X_{0L}) = U_{0M} + l \cdot I_0 \cdot X_{0L}$$

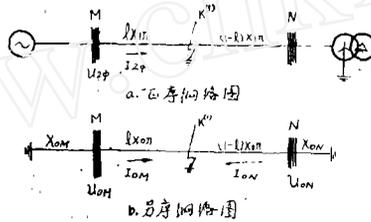
$$\text{解出 } l = \frac{U_{0N} - U_{0M}}{I_{0*} \cdot X_{0L*}} \dots \dots \dots (4-5)$$

仿照(2-2)式, (4-5)式也可用另序电流、电压二次值表示。

需要指出: 一般情况下 $U_{0N} \neq \frac{E_\phi}{3}$, 这是由于 I_0 在非故障相上产生感应电压所引起的。

的, 所以 U_{0N} 不能用 $\frac{E_\phi}{3}$ 来代替。只有在 $\frac{X_{0M}}{X_{2M}} = 1$ 的特殊情况下才有: $U_{0N} = \frac{E_\phi}{3}$ 。

4. 无电源侧变压器接地的单相接地故障



图六 单电源无电源侧变压器接地单回线单相接地短路

$$\text{在单相接地故障时: } I_{1\phi} = I_{2\phi} = I_{0M} + I_{0N} \quad I_{0N} = I_{2\phi} - I_{0M}$$

无电源侧母线另序电压 $U_{0N} = (I_{2\phi} - I_{0M}) \cdot X_{0N}$, 其中: X_{0N} 无电源侧变压器另序阻抗实测值

在 $U_{0M*}, U_{0N*}, I_{0M*}, I_{0N*}, X_{0L*}$ 均已知条件下可用(2-1)式求出 l 值。

5. 无电源侧变压器接地的两相接地故障

参见图六, 在两相接地短路时: $I_{1\phi} = I_{2\phi} + I_{0M} + I_{0N}, I_{0N} = I_{1\phi} - I_{2\phi} - I_{0M}$

无电源侧母线另序电压 $U_{0N} = (I_{1\phi} - I_{2\phi} - I_{0M}) \cdot X_{0N}$

在 $U_{0M*}, U_{0N*}, I_{0M*}, I_{0N*}, X_{0L*}$ 均已知条件下亦可用(2-1)式求出 l 值。

本节 1、2、4、5、四种故障点计算, 仅适用在电源侧装有录波器的单电源线路。如果无电源侧也装有录波器则 4、5、两种情况, 可按第二节双电源单回线接地短路计算 l 值的方法直接计算。

五、单电源平行双回线的接地短路

适用于仅电源侧装有录波器的双回线路。

1. 无电源侧变压器不接地的接地短路

单相和两相接地短路时另序网络图(见图七)相同, 所以计算故障点的方法也相同。

对应另序等值网络图 T, K 两点间另序电压有等式:

$$U_{0TK} = I_0 l [(X_{0L} - X_{0M}) + (1-l) \cdot (X_{0L} - X_{0M})] = l \cdot I_0 l (X_{0L} - X_{0M})$$

$$\frac{I_{0I}}{I_{0II}} = \frac{I \cdot (X_{0I} - X_{0M})}{(X_{0I} - X_{0M}) + (1-l) \cdot (X_{0I} - X_{0M})}$$

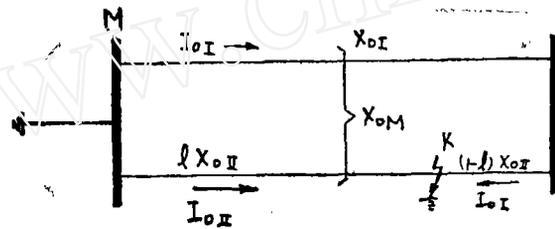
$$I \cdot \left(\frac{I_{0I}}{I_{0II}} + 1 \right) \cdot (X_{0I} - X_{0M}) = \frac{I_{0I}}{I_{0II}} \cdot (X_{0I} + X_{0I} - 2X_{0M})$$

$$\text{解出 } l = \frac{I_{0I}}{I_{0I} + I_{0II}} \cdot \frac{X_{0I} + X_{0I} - 2 \cdot X_{0M}}{X_{0I} - X_{0M}} \dots \dots \dots (5-1)$$

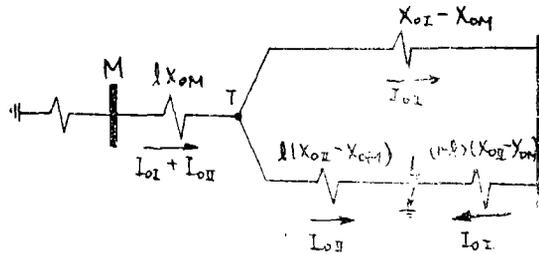
若两回线另序阻抗 $X_{0I} = X_{0II} = X_{0II}$ 则得:

$$l = \frac{2 \cdot I_{0I}}{I_{0I} + I_{0II}} \dots \dots \dots (5-2)$$

(5-1) 和 (5-2) 式用标么值或具名值计算均可。若两回线变压器变比相同, 另序电流可直接取用二次具名值计算。



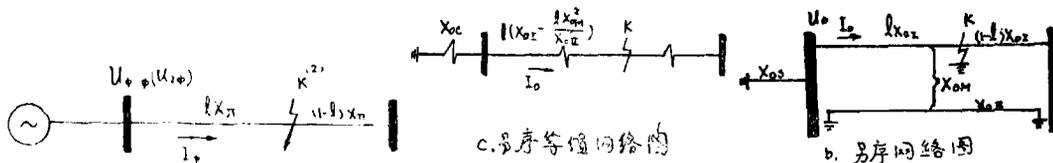
a. 另序网络图



b. 另序等值网络图

图七 单电源无电源侧变压器不接地平行线一回线接地短路

2. 无电源侧变压器不接地的平行线一回线检修且两端接地时运行线路的接地短路。



图八 单电源无电源侧变压器不接地平行线一回线检修且两端接地运行线路的接地短路

(1)、单相接地短路

用标么值表示的单相接地故障时另序电流(见图八)为:

$$I_0 = \frac{I}{2(X_{1C} + l \cdot X_{1l}) + \left[X_{0C} + l \cdot \left(X_{0l} - \frac{l \cdot X_{0M}^2}{X_{0l}} \right) \right]}$$

$$\frac{I}{I_0} = 2 \cdot X_{1C} + X_{0C} + l \cdot (2 \cdot X_{1l} + I_{0l}) - \frac{l^2 \cdot X_{0M}^2}{X_{0l}}$$

将 $X_{1C} = \frac{U_{2\phi}}{I_0}$, $X_{0C} = \frac{U_0}{I_0}$ 代入上式整理后得:

$$\frac{X_{0M}^2}{X_{0l}} \cdot l^2 - l \cdot (2 \cdot X_{1l} + X_{0l}) + \frac{I}{I_0} \cdot (1 - 2U_{2\phi} - U_0) = 0$$

令 $K_1 = \frac{X_{0l} I^*}{X_{0M}^2}$; $K_2 = 2 \cdot X_{1l}^* + X_{0l}^*$; 并去掉大于 1 的根:

$$\text{解出 } l = 0.5 K_1 \left[K_2 - \sqrt{K_2^2 - \frac{4}{K_1 I_{0*}} (1 - 2U_{2\phi*} - U_{0*})} \right] \dots \dots (5-3)$$

当两回线阻抗参数相等且 $X_{0\pi} = 3 X_{1\pi}$ 时(5-3)式变为:

$$l = 1.5 K \cdot \left[5 \cdot X_{1\pi}^* - \sqrt{25 \cdot X_{1\pi}^2 - \frac{1.333}{K \cdot I_{0*}} (1 - 2U_{2\phi*} - U_{0*})} \right] \dots (5-4)$$

其中: $K = \frac{X_{1\pi}^*}{X_{0M}^2}$

(2)、两相接地短路

参见图八, 利用两相接地短路时的另序电流表达式, 仿照单相接地短路的求导方法, 得出 l 的计算式为:

$$l = 0.25 K_1 \left[K_2 - \sqrt{K_2^2 - \frac{8}{K_1 I_{0*}} \left(1 - \frac{I_{0*}}{I_{2\phi*}} \cdot U_{2\phi*} - 2U_{0*} \right)} \right] \dots (5-5)$$

其中: $K_1 = \frac{X_{0l} I^*}{X_{0M}^2}$; $K_2 = X_{1l}^* + 2 \cdot X_{0l}^*$

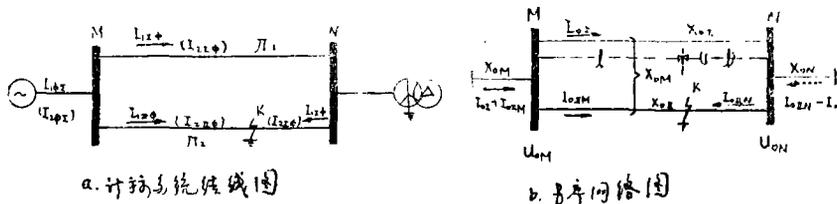
同样当 $X_{0l} = X_{0l} = X_{0\pi}$; $X_{1l} = X_{1\pi}$; 且 $X_{0\pi} = 3 X_{1\pi}$ 时有:

$$l = 0.75 K \left[7 X_{1\pi}^* - \sqrt{49 \cdot X_{1\pi}^2 - \frac{2.667}{K \cdot I_{0*}} \left(1 - \frac{I_{0*}}{I_{2\phi*}} U_{2\phi*} - U_{0*} \right)} \right] \dots (5-6)$$

其中: $K = \frac{X_{1\pi}^*}{X_{0M}^2}$

3. 无电源侧变压器接地的接地短路

平行线中一回线检修器两端接地运行线路的单相及两相接地短路计算 l 值的方法与第四节中的 3、4、完全相同。



图九 单电源无电源侧变压器接地平行线一回线接地短路

双回线运行其中一回线的接地故障计算 l 值的方法，也可按第四节单回线无电源侧变压器接地时计算故障点方法处理，此时 N 侧母线的另序电压（参见图九）为：

对单相接地短路：
$$U_{0N} = (I_{2\phi M} - I_{0IM} - I_{0I}) \cdot X_{0N}$$

对两相接地短路：
$$U_{0N} = (I_{1\phi M} - I_{2\phi M} - I_{0IM} - I_{0I}) \cdot X_{0N}$$

两式中 I_{0I} 的正负，应与 I_{0IM} 进行相位比较来确定。

当线路两侧装有录波器时，则双回线无电源侧变压器接地的线路，可按第三节中的公式计算接地故障点。

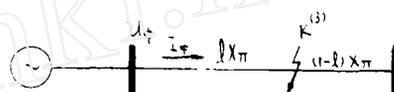
六、单电源线路的三相及两相短路

适用于仅电源侧装有录波器的线路。

1. 单回线路

(1) 三相短路

见图十，三相短路时有如下关系：



图十 单电源单回线三相短路

$$U_{\phi} = l \cdot I_{\phi} \cdot X_{\Pi}$$

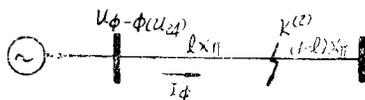
解出 $l = \frac{U_{\phi^*}}{I_{\phi^*} \cdot X_{\Pi^*}} \dots \dots \dots (6-1)$

若用相电流、相电压二次具名值表示时：

$$l = \frac{\frac{U_{\phi(2)}}{U_{B\phi(Y)}}}{\frac{I_{\phi(2)} \cdot \Pi_T}{I_B} \cdot X_{\Pi^*}} = \frac{U_{\phi(2)}}{I_{\phi(2)} \cdot X_{\Pi^*}} \times \frac{I}{K} \dots \dots \dots (6-2)$$

其中：变换系数 $K = \frac{U_{B\phi(Y)} \cdot \Pi_T}{I_B}$

(2) 两相短路



图十一 单电源单回线两相短路

见图十一，两相短路时有如下关系：
$$U_{\phi-\phi} = 2 \cdot l \cdot I_{\phi-\phi} \cdot X_{\Pi}$$

解出 $l = \frac{U_{\phi-\phi^*}}{2 \cdot I_{\phi-\phi^*} \cdot X_{\Pi^*}} \dots \dots \dots (6-3)$

若用相电流，相间电压二次具名值表示时：

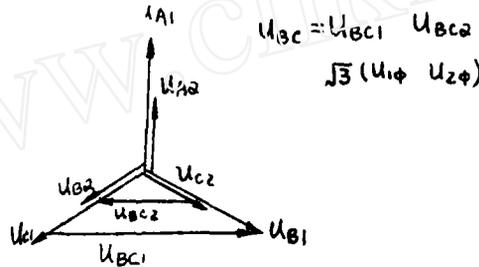
$$I = \frac{U_{\phi-\phi(2)}}{2 I_{\phi(2)} X_{\Pi*}} \times \frac{1}{K} \dots\dots\dots (6-4)$$

其中：变换系数 $K = \frac{\sqrt{3} U_{B\phi(r)} \cdot \Pi_T}{I_B}$

故障相间电压 $U_{\phi-\phi}$ 可由录波量直接给出；也可由故障相电压幅值及两故障相 U_{ϕ} 之相位差角 ϕ 计算出，在电源阻抗角与线路阻抗角相差不大时有： $U_{\phi-\phi} = 2 \cdot U_{\phi} \cdot \sin \frac{\phi}{2}$

若录波量中给出了母线电压 $U_{1\phi}$ 和 $U_{2\phi}$ （或只给出 $U_{2\phi}$ ）则有（见图十二）：

$$U_{\phi-\phi} = \sqrt{3} (U_{1\phi} - U_{2\phi})$$



图十二 BC 两相短路母线正负序电压关系

由 $U_{1\phi*} + U_{2\phi*} = 1$ 得出： $U_{\phi-\phi*} = \sqrt{3} (1 - 2 \cdot U_{2\phi*})$

此时式 (6-3) 可写成：
$$I = \frac{\sqrt{3} (U_{1\phi*} - U_{2\phi*})}{2 \cdot I_{\phi*} \cdot X_{\Pi*}} = \frac{\sqrt{3} (1 - 2 \cdot U_{2\phi*})}{2 \cdot I_{\phi*} \cdot X_{\Pi*}} \dots\dots\dots (6-5)$$

若录波量中同时还给出了故障线路的 $I_{1\phi}$ 、 $I_{2\phi}$ （或其中一个量）因为： $U_{1\phi} = U_{1\phi K} + I \cdot I_{1\phi} \cdot X_{\Pi}$ ； $U_{2\phi} = U_{2\phi K} - I \cdot I_{1\phi} \cdot X_{\Pi}$

由于 $I_{1\phi} = -I_{2\phi}$ ； $U_{1\phi K} = U_{2\phi K}$

所以： $U_{1\phi} - U_{2\phi} = 2 \cdot I \cdot I_{1\phi} \cdot X_{\Pi} = 2 \cdot I \cdot I_{2\phi} \cdot X_{\Pi}$

$$I = \frac{U_{1\phi*} - U_{2\phi*}}{2 \cdot I_{1\phi*} \cdot X_{\Pi*}} = \frac{U_{1\phi*} - U_{2\phi*}}{2 I_{2\phi*} \cdot X_{\Pi*}} = \frac{U_{1\phi*} - U_{2\phi*}}{(|I_{1\phi*}| + |I_{2\phi*}|) X_{\Pi*}} \dots\dots\dots (6-6)$$

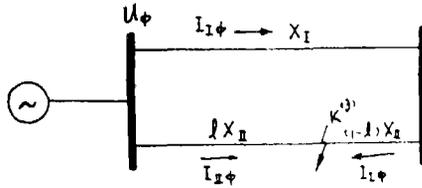
当然 (6-6) 式的分子也可用 $(1 - 2U_{2\phi*})$ 取代 $(U_{1\phi*} - U_{2\phi*})$ 。

顺便指出，三相短路 I 值的计算也可用对称分量表示为：

$$I = \frac{U_{1\phi*}}{I_{1\phi*} \cdot X_{\Pi*}} \dots\dots\dots (6-7)$$

需要说明，单电源单回线相间故障点的计算公式 (6-1) ~ (6-4) 式，对单电源双回线、双电源单或双回线的相间故障点计算也是适用的。

2. 平行双回线路



见图十三 单电源平行线一回线的三相短路

见图十三，双回线其中一回线三相短路时，每回线的电流和电源侧母线相电压有如下关系：

$$U_{\phi} = I_{II\phi} \cdot l \cdot X_{II} = I_{I\phi} \cdot [X_I + (1-l) \cdot X_{II}]$$

$$\text{解出 } l = \frac{I_{I\phi}}{I_{I\phi} + I_{II\phi}} \cdot \frac{X_{II*} + X_{II*}}{X_{II*}} \dots \dots \dots (6-8)$$

$$\text{当双回线阻抗 } X_{II} = X_{II'} = X_{II''} \text{ 时: } l = \frac{2 I_{I\phi}}{I_{I\phi} + I_{II\phi}} \dots \dots \dots (6-9)$$

(6-8)、(6-9)两式用具名值和标么值计算均可。在两回线变流器变比相同时，电流可直接使用二次具名值代入计算。

在双回线其中一回线两相短路时，电源侧母线故障相相间电压与故障相电流有下述关系：

$$U_{\phi-\phi} = 2 \cdot l \cdot I_{II\phi} \cdot X_{II} = 2 \cdot I_{I\phi} \cdot [X_I + (1-l) \cdot X_{II}]$$

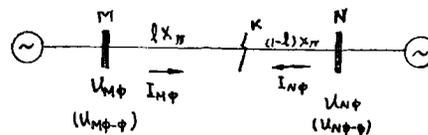
由该式解出的 l 值与 (6-8)、(6-9) 两式相同，所以这种情况下三相短路计算 l 值公式完全适用于两相短路。

七、双电源线路的三相及两相短路

适用于两侧均装有录波器的线路。

1. 单回线路

一侧用第六节公式 (6-1) ~ (6-7) 式计算，再利用对侧录波量进行核算，方法如下 (见图十四)：



图十四 双电源单回线三相(两相)短路

例如用 N 侧电气量核算，故障时母线电压及故障电流关系式为：

$$\text{三相短路时: } U_{N\phi} = (1-l) \cdot I_{N\phi} \cdot X_{II} \text{ 解出 } l = 1 - \frac{U_{N\phi*}}{I_{N\phi*} \cdot X_{II*}} \dots \dots \dots (7-1)$$

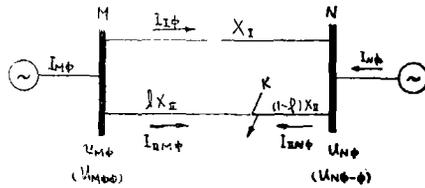
$$\text{两相短路时: } U_{N\phi-\phi} = 2 \cdot (1-l) \cdot I_{N\phi} \cdot X_{II} \text{ 解出 } l = 1 - \frac{U_{N\phi-\phi*}}{2 \cdot I_{N\phi*} \cdot X_{II*}} \dots \dots \dots (7-2)$$

两侧 l 值的计算结果应相同或接近。若用电流、电压二次具名值计算可仿照 (6-2) 和 (6-4) 两式处理。

2. 平行双回线路

见图十五，在线路 II 上发生三相短路，对应 M 侧母线相电压有： $U_{M\phi} = I_{II\phi} \cdot l \cdot X_I$

$$= I_{I_{N\phi}} \cdot (1 - l) \cdot X_I \pm I_{I_{\phi}} \cdot X_I$$



图十五 双电源平行线一回线三相(两相)短路

$$\text{解出 } l = \frac{I_{I_{N\phi}}}{I_{I_{M\phi}} + I_{I_{N\phi}}} \pm \frac{I_{I_{\phi}}}{I_{I_{M\phi}} + I_{I_{N\phi}}} \times \frac{X_{I^*}}{X_{II^*}} \dots \dots (7-3)$$

当两回线阻抗 $X_I = X_{II} = X_{II^*}$ 时:

$$l = \frac{I_{I_{N\phi}} \pm I_{I_{\phi}}}{I_{I_{M\phi}} + I_{I_{N\phi}}} \dots \dots (7-4)$$

两式中 $I_{I_{\phi}}$ 的正负, 可由 $I_{M\phi}$ 和 $I_{I_{M\phi}}$ (或 $I_{N\phi}$ 和 $I_{I_{N\phi}}$) 进行数字或相位比较确定, 也可用 $I_{I_{\phi}}$ 和 $I_{I_{M\phi}}$ (或 $I_{I_{N\phi}}$) 进行相位比较确定, 当 $I_{I_{\phi}}$ 由 M 母线流向 N 母线时为正值, 否则为负值。

在线路 II 上发生两相短路有:

$$U_{M\phi-\phi} = 2 \cdot l \cdot I_{I_{M\phi}} \cdot X_{II} = 2 \cdot (1 - l) \cdot I_{I_{N\phi}} \cdot X_{II} \pm 2 \cdot I_{I_{\phi}} \cdot X_I$$

根据此式可导出 (7-3) 式的结果来, 可见这种情况下三相和两相短路计算 l 值的表达式是相同的。

(7-3) 和 (7-4) 两式用标么值和具名值计算均可。在两回线变流器变比相同时, 两式中的电流可用二次具名值计算。

八、关于测取录波量的建议

为使故障录波器在迅速判定线路故障点中发挥作用, 在 110 千伏及以上系统中应尽快实现: 双电源线路两侧 (包括单电源线路, 但无电源侧变压器中性点接地运行的情况) 和单电源线路的电源侧都装用故障录波器。

110 千伏及以上系统的线路故障中, 单相接地故障约占 90%, 所以录波量应优先录取与计算单相接地有关的电气量。单相接地以外的线路故障尽管机率很小, 也应该对运行条件恶劣易出故障的长线路实行重点监视, 在录波量充裕的情况下, 测量与计算两相接地及相间故障点有关的电气量。对于平行的双回线, 由于利用双回线中的一回线故障时电流分布的特点计算故障点较为简便, 所以应尽量安排测取与其有关的电流量。线路故障统计资料表明, 线路相间故障约占全部次数的 4%, 因而在录波振子不充足的情况下, 相间故障应放到次要位置上考虑。

需要指出: 1. 单电源无电源侧变压器不接地的分支幅射线路, 在电网中所占比例很大, 为计算它的接地故障点, 录波量中应测取 $U_{2\phi}$ 、 $I_{2\phi}$, 目的是要求出线路背侧正(负)序电源阻抗值, 这个阻抗值也可以按故障当时电网运行方式算出, 再代入文中相应的

计算式算出 l 值。2. 单电源无电源侧变压器接地的方式相当于下述几种情况：(1)、无电源侧是220千伏自耦变压器，其中性点必须接地；(2) 由于另序电流保护整定上的要求，单分支的中间或终端变电所变压器需要接地；(3) 环网的中间变电所在某一侧开环运行，原来接地的变压器仍保持接地运行。所以这种方式的线路接地故障点计算需要加以考虑。

为提高计算故障点的精度，应当强调基础计算数据的准确性，下面两点值得注意：

1. 线路的正序、另序阻抗及平行双回线的另序互感阻抗应采用实测值；对于需要用变压器另序阻抗计算本侧母线另序电压的接地变压器，其阻抗也要使用实测值。

2. 录波量的数值是计算故障点的基本依据，应该精确测量，除保证录波片单位值准确外，最好使用放大后的录波片量取电流、电压的幅值，例如135或120胶卷以放大三倍测量为好。

计算线路不同类型的故障点距离，需要测取的录波量见“各种故障下计算短路点应测取的录波量表”。

附表 各种故障下计算短路点应测取的录波量表

	单或双电源	单或双回线	运行条件	短路类型	应测取的录波量	
接	双路有录波 电源侧装器	单回线	环形或开环运行	$K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$	两侧 U_0 两侧每线 I_0	
		平行	双回线运行			
		双回线	一回线检修两端接地			
地 短 路	单电源线路仅电源侧装有录波器	单回线	无电源侧变压器中性点不接地	$K^{(1)}$	$U_0, I_0, U_{2\phi}$	①
				$K^{(1,1)}$	$U_0, I_0, U_{2\phi}, I_{2\phi}$	
		单回线	无电源侧变压器中性点接地	$K^{(1)}$	$U_0, I_0, I_{2\phi}$	②
				$K^{(1,1)}$	$U_0, I_0, I_{1\phi}, I_{2\phi}$	
		平行双回线	无电源侧变压器中性点不接地	$K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$	每线 I_0	
			无电源侧变压器中性点接地	$K^{(1)}$	$U_0, \text{每线 } I_0, I_{2\phi}$	②
				$K^{(1,1)}$	$U_0, \text{每线 } I_0, I_{0\phi}, I_{2\phi}$	
		平行双回线一回线检修两端接地	无电源侧变压器中性点不接地	$K^{(1)}$	$U_0, I_0, U_{2\phi}$	①
				$K^{(1,1)}$	$U_0, I_0, U_{2\phi}, I_{2\phi}$	
		平行双回线一回线检修两端接地	无电源侧变压器中性点接地	$K^{(1)}$	$U_0, I_0, I_{2\phi}$	②
	$K^{(1,1)}$		$U_0, I_0, I_{1\phi}, I_{2\phi}$			
相间短路	单双路电源或电源线路	单回线		$K^{(2)}$	$U_\phi, I_\phi \text{ 或 } U_{2\phi}, I_{2\phi}$	
		单回线		$K^{(3)}$	$U_\phi, I_\phi \text{ 或 } U_{1\phi}, I_{1\phi}$	
		平行双回线		$K^{(2)}, K^{(3)}$	(两侧) 每线 I_ϕ	

说明：1. 表后○内所标数字相同者所测取的录波量相同。

2. 双电源线路包括电源线路中对侧变压器接地两侧均装有录波器者。