

单电源平行线横差方向保护定值计算

黑龙江省西部电力网调度局 姚长华

单电源平行线横差方向保护，可利用双回线正序及零序等值网络，写出短路电流的表达式，并用导出的公式较为精确的算出保护的差流元件相继动作区、灵敏度，方向元件死区，方向元件能否限制差流元件相继动作区等数值，实用上是很方便的。

这里以XJHC—1 (PWB—75Y002)型横差方向保护屏诸元件定值计算为例，介绍单电源相间和接地横差方向保护的计算方法。对于大家所熟知的双回线横差保护定值选择的一般方法，文中仅稍加说明，不作详细介绍。

文中计算公式是以保护整定计算中通常使用的标么值为基础导出的，并取相电势的标么值为1，对于需要用标么值计算的电气量和电抗量，加有标么值等符号“*”，公式中的电抗值X也可用阻抗值Z代入计算，公式导出还利用了两回线正序（零序）阻抗相等的条件，若两回线阻抗不等且其差值小于5%，则可使用两回线平均阻抗进行计算。

计算式中符号的含义说明

I_b ：	标么电流基准值	$U_{\phi-\phi}^{(2)}$ ：	PJ二次额定线电压
I_D ：	短路电流	$U_{\phi-\Delta}^{(3)}$ ：	PJ开三角侧额定相电压
I_{cl} ：	保护通过差流的一次值	P_J^* ：	继电器感受功率
$I_{cl.J}$ ：	继电器通过的差流值	$P_{dx.J}^{**}$ ：	继电器动作功率
I_{dx} ：	保护一次动作电流	X_{xJ}^{**} ：	线路电抗
$I_{dx.J}$ ：	继电器动作电流	X_{0M} ：	线路零序互感抗
I_J ：	继电器通过的电流	X_{x1} ：	系统电源电抗
U_{cJ} ：	短路时母线残压	K_K^* ：	可靠系数
U_{dx} ：	保护一次动作电压	K_{lm}^* ：	灵敏系数
$U_{dx.J}$ ：	继电器动作电压	C ：	分流系数

一、故障电气量的基础计算公式

(一) 相间故障计算公式

见图一。线路ID点相间短路，令 $K = \frac{X_{x1}}{X_{x2}}$

1. 短路时正序综合电抗：

$$x_{x12} = \frac{lX_{x1}[X_{x1} + (1-l)X_{x2}]}{lX_{x1} + X_{x1} + (1-l)X_{x2}} = \frac{l(2-l)x_{x1}}{2} = \left(l - \frac{l^2}{2}\right)x_{x1} \dots\dots\dots (1-1)$$

其中 l ：故障点至 M 母线距离占线路全长的百分数，以下同。

若故障发生在线路中点，即 $l = 0.5$ 代入 (1-1) 式得：

$$x_{x1\Sigma 0.5}^{\#} = \frac{(2 - 0.5) \cdot 0.5 X_{x1\Sigma}}{2} = 0.375 X_{x1} \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

正序电流分配系数

$$\text{路线 I: } C_{1I}^{\#} = \frac{x_{x1\Sigma}^{\#}}{l x_{x1}} = \frac{2-l}{2} \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

$$\text{路线 II: } C_{1II}^{\#} = \frac{x_{x1\Sigma}^{\#}}{x_{x1} + (1-l)x_{x1}} = \frac{l}{2} \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

2. 包括电源的正序综合电抗：

$$\begin{aligned} x_{\Sigma}^{\#} &= K x_{x1\Sigma} + \left(1 - \frac{l^2}{2}\right) x_{x1} = \left(K + 1 - \frac{l^2}{2}\right) x_{x1} \\ &= \frac{2K + 2l - l^2}{2} x_{x1} \quad \dots\dots\dots (1-5) \end{aligned}$$

3. 短路点总电流及线路电流

$$\text{三相短路: } I_{D*}^{(3)} = \frac{1}{x_{\Sigma*}^{\#}} = \frac{2}{(2K + 2l - l^2) x_{x1*}} \quad \dots\dots\dots (1-6)$$

$$\text{二相短路: } I_{D*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{x_{\Sigma*}^{\#}} = \frac{\sqrt{3}}{(2K + 2l - l^2) x_{x1*}} \quad \dots\dots\dots (1-7)$$

故障线路 I 的短路电流：

$$I_{DI*} = C_{1I}^{\#} I_{D*} = \frac{2-l}{(2K + 2l - l^2) x_{x1*}} \quad \dots\dots\dots (1-8)$$

非故障线路 II 的短路电流：

$$I_{DII*} = C_{1II}^{\#} I_{D*} = \frac{l}{(2K + 2l - l^2) x_{x1*}} \quad \dots\dots\dots (1-9)$$

4. 两侧相间横差保护通过的差流一次值

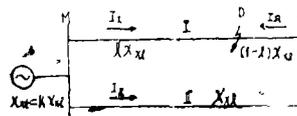
$$\text{电源侧: } I_{cIM*} = I_{DI*} - I_{DII*} = \frac{(1-l)}{(K + 1 - \frac{l^2}{2}) x_{x1*}} \quad \dots\dots\dots (1-10)$$

$$\text{受电侧: } I_{cIN*} = 2 I_{DII*} = \frac{l}{(K + 1 - \frac{l^2}{2}) x_{x1}} \quad \dots\dots\dots (1-11)$$

5. 母线残压

$$\text{电源侧母线: } U_{cVM*}^{\#} = \frac{x_{x1\Sigma}^{\#}}{x_{\Sigma*}^{\#}} = \frac{2l - l^2}{2K + 2l - l^2} \quad \dots\dots\dots (1-12)$$

$$\begin{aligned} \text{受电侧} \\ \text{母线: } U_{cVN*}^{\#} &= U_{cVM*}^{\#} \frac{(1-l)}{(2-l)} = \frac{(1-l)l}{2K + 2l - l^2} \\ &\dots\dots\dots (1-13) \end{aligned}$$



图一正序阻抗计算图

(二) 接地故障计算公式

适用于受电侧变压器中性点不接地的方式

见图二。线路 ID 点接地短路，其零序阻抗等值网络见图三（零序等值网络的求作方法见附录）。

1. 线路零序综合电抗:

$$x_{0x1\Sigma} = l x_{0M} + \frac{(2-l)(x_{0x1} - x_{0M})l(x_{0x1} - x_{0M})}{(2-l)(x_{0x1} - x_{0M}) + l(x_{0x1} - x_{0M})}$$

$$= l x_{0M} + \frac{(2-l)l}{2}(x_{0x1} - x_{0M}) \dots\dots (1-14)$$

若线路中点接地短路, 将 $l = 0.5$ 代入(1-14)式得:

$$x_{0x1\Sigma 0.5} = 0.5x_{0M} + 0.375(x_{0x1} - x_{0M}) \dots\dots (1-15)$$

2. 包括电源的零序综合电抗

$$x_{0\Sigma} = x_{0x1} + l x_{0M} + \frac{(2-l)l}{2}(x_{0x1} - x_{0M}) \dots\dots (1-16)$$

3. 零序电流分配系数

线路 I: $C_{0I} = \frac{(2-l)(x_{0x1} - x_{0M})}{(2-l)(x_{0x1} - x_{0M}) + l(x_{0x1} - x_{0M})}$

$$= \frac{2-l}{2} \dots\dots (1-17)$$

线路 II: $C_{0II} = \frac{l(x_{0x1} - x_{0M})}{(2-l)(x_{0x1} - x_{0M}) + l(x_{0x1} - x_{0M})}$

$$= \frac{l}{2} \dots\dots (1-18)$$

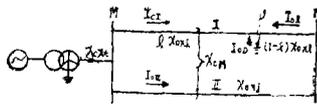
由此可知零序电流与正序电流的分配系数相同。

4. 两侧接地横差保护通过的零序差流一次值

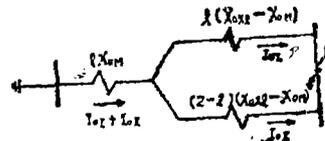
电源侧: $I_{ocIM} = I_{0I} - I_{0II} = \left(\frac{2-l}{2} - \frac{l}{2}\right) I_{0D} = (1-l) I_{0D} \dots\dots (1-19)$

受电侧: $I_{ocINM} = 2 I_{0II} = l I_{0D} \dots\dots (1-20)$

其中 I_{0D} : 故障点总的零序电源



图二 零序阻抗计算图



图三 零序阻抗等值网络图

二、电源侧相间横差方向保护的计算

1. 接于相间电压的低压闭锁元件:

(1) 按常规确定一次动作电压标么值, 一般取 $U_{d.r*} = 0.7$

(2) 校验灵敏度

(1) 线路中点三相短路, 两侧均未切开的情况下, 将 $l = 0.5$ 代入(1-12)式计算:

$$K_{lm}^{(2)} = \frac{U_{dz*}}{U_{cYM*}} = \frac{U_{dz*}}{2K + 2 \times 0.5 - (0.5)^2} = U_{dz*} (2.667K + 1) \geq 2 \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

其中K值计算时取系统最小电源阻抗标么值 $X_{xl.Min*}$

②受电侧出口三相短路，受电侧先切开时：

$$K_{lm} = \frac{U_{dz*}}{U_{cY*}} = \frac{U_{dz*} (X_{xl.Min*} + X_{xl*})}{X_{xl*}} = U_{dz*} (K + 1) \geq 1.3$$

若灵敏度不能满足要求，可再适当提高保护的動作电压值到 $U_{dz*} = 0.75$

2. 差流元件

(1) 按接受电側母线三相短路不平衡电流，计算差流元件一次動作电流 I_{dz} 、继电器動作电流 I_{dzj} 及一次動作标电流值 I_{dz*} 。由于横差保护设有电压闭锁元件及采用了接地短路时闭锁相间横差的接线，故可不躲单回线最大负荷电流和相继切除接地故障时非故障相电流。

(2) 校验灵敏度

①线路中点两相短路，将 $l = 0.5$ 代入(1-10)式，求得灵敏系数为：

$$K_{lm}^{(2)} = \frac{I_{clm}^{(2)}}{I_{dz*}} = \frac{0.866 (1 - 0.5)}{(K + 0.5 - \frac{(0.5)^2}{2}) X_{xl*}} = \frac{0.433}{I_{dz*} (K + 0.375) X_{xl*}} \geq 2 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

②受电側出口二相短路，受电側先切开时：

$$K_{lm} = \frac{I_{clm}^{(2)}}{I_{dz*}} = \frac{0.866}{(I_{dz*} (X_{xl.Max*} + X_{xl*}))} = \frac{0.866}{I_{dz*} (K + 1) X_{xl*}} \geq 1.3$$

上面两式中K值计算时取系统最大电源阻抗标么值 $X_{xl.Max*}$

(3) 相继動作区计算

设相继動作区边缘至电源側母线长度为 l ，在该点发生两相短路时，差流元件刚好

起动作，因而有： $I_{clm}^{(2)} = I_{dz*}$

由(1-10)式得： $I_{dz*} = \frac{0.866 (1 - \frac{l^2}{2})}{(K + l - \frac{l^2}{2}) X_{xl*}}$ 其中K值用 $X_{xl.Max*}$ 计算

令： $I_{dz*} X_{xl*} = A$ ，移项整理：

$$I_{dz*} X_{xl*} (K + l - \frac{l^2}{2}) = 0.866 (1 - l)$$

$$\frac{A}{2} l^2 - (A + 0.866) l + (0.866 - AK) = 0$$

$$\text{解出 } l = \frac{(A + 0.866) \pm \sqrt{(A + 0.866)^2 - 4 \frac{A}{2} (0.866 - AK)}}{A}$$

$$l = \left(1 + \frac{0.866}{A} \right) \pm \sqrt{1 + 2K + \frac{0.75}{A^2}} \dots\dots\dots (2-3)$$

取 $0 < l < 1$ 的根

M 侧横差保护相继动作区靠近 N 侧母线,其边缘点距 N 母线长度 $l_M = (1 - l)$ 。要求 M 、 N 两侧横差相继动作区长度之和,即 $l_M + l_N$,应小于线路全长的50%。

3. 功率方向元件

(1) 按常规采用电流进相 90° 接线,内角 α 可根据短路阻抗角 $\bar{\phi}_S$ 值确定。

(2) 方向允许能否增加差流元件相继动作区验算

因两相短路时有非故障相电压,接地短路时相间横差又被闭锁,所以只校三相短路。

在差流元件相继动作区边缘三相短路时,横差动作电流与横差感受差流相等,所以有:

$$I_{dx*} = I_{clM*} = (1 - l) I_{D*}$$

由此可得出差流元件起动点三相短路时总的故障电流为:

$$I_{D*} = \frac{I_{dx*}}{(1 - l)}$$

式中的 l 用(2-3)式计算结果代入。

将(1-3式)分流系数代入上式,求出故障线路的三相短路电流:

$$I_{DI*} = \frac{2 - l}{2} I_{D*} = \frac{(2 - l) I_{dx*}}{2(1 - l)}$$

故障时电源侧母线残压为:

$$U_{cYM*} = I_{DI*} l X_{xl} = \frac{l(2 - l) I_{dx*} X_{xl}^*}{2(1 - l)}$$

方向元件感受的残压二次值:

$$U_j = U_{cYM*} U_{\phi-\phi(i)}$$

其中 $U_{\phi-\phi(i)}$ 一般为 $100V \sim 105V$

在方向继电器 $P = f(I)$ 特性曲线上,查出在差流元件动作电流 I_{dx*} 下的动作电压 U_{dx*} 。若 $U_j > U_{dx*}$,则方向元件不增加差流元件相继动作区。若 $U_j < U_{dx*}$,则应设法降低方向元件动作功率,例如适当放松弹簧,但弹簧拉角不得小于 100° ,并很好的消除电压电流潜动。

(3) 线路出口三相短路时,方向元件死区计算

为简化计算,接线路出口 $l = 0.1$ 处三相短路计算差流,由(1-10)式可得差流为:

$$I_{clM*} = \frac{1 - 0.1}{\left(K + 0.1 - \frac{(0.1)^2}{2}\right) X_{xl}^*} = \frac{0.9}{(K + 0.095) X_{xl}^*}$$

其中 K 值用 $X_{xlM}^* X_{xl}^*$ 计算

$$\text{方向元件通过的差流二次值为: } I_j^* = \frac{I_{clM*} I_E}{\Pi_{LH}}$$

在方向元件 $P = f(I)$ 曲线上,查出 I_j 下的继电器动作电压 $U_{dx*}^{(K)}$ 。求出 U_{dx*} 的一次标么值: $U_{dx*} = \frac{U_{dx*}^{(K)}}{U_{\phi-\phi(i)}}$ 。

线路故障时电源侧母线残压按(1-12)式计算,考虑到在方向元件死区边缘短路有: $U_{dx*} = U_{cVM*}$

$$\text{由此得出: } U_{dx*} = \frac{2l - l^2}{2K + 2l - l^2}$$

$$\text{移项整理: } l^2 - 2l + \frac{2KU_{dx*}}{1 - U_{dx*}} = 0$$

$$\text{解出 } l = 1 - \sqrt{1 - \frac{2KU_{dx*}}{1 - U_{dx*}}}$$

其中K值用 $X_{x1.Max*}$ 计算

由于使用线路出口固定点的短路电流进行求解,所以该求解过程是应用起来较为简单的实用算法。解出的电源侧方向元件死区长度 l_M 与实际的方向元件死区的偏差有下述三种情况:当 $l_M = 0.1$ 时无偏差;当 $l_M < 0.1$ 时 l_M 比实际死区略大;当 $l_M > 0.1$ 时 l_M 比实际死区略小。计算所得的 l_M 应小于线路全长的10%。

三、受电侧相间横差方向保护计算特点

受电侧与电源侧横差方向保护定值计算方法类同,现仅就其特殊点加以说明。

1. 低压闭锁元件灵敏度

(1) 线路中点三相短路,将 $l = 0.5$ 代入(1-13)式得出:

$$U_{cVM*} = U_{cVM*} \frac{1 - 0.5}{2 - 0.5} = \frac{1}{3} U_{cVM*}$$

其中 U_{cVM*} 可由(2-1)式求得

(2) 电源侧线路出口三相短路,且电源侧先切开时,受电侧母线残压:

$$U_{cVN*} = \frac{X_{x1*}}{X_{x1.Min*} + 2X_{x1}} = \frac{1}{K + 2}$$

低压元件灵敏度要求与电源侧相同。

2. 差流元件

(1) 计算线路中点两相短路的灵敏度,将 $l = 0.5$ 代入(1-11)式,求得两相短路差流一次值为:

$$I_{cIN*} = \frac{0.866 \times 0.5}{(K + 0.5 - \frac{(0.5)^2}{2}) X_{x1*}} = \frac{0.433}{(K + 0.375) X_{x1*}}$$

此式与电源侧差流元件感受的差流表达式完全相同[参见(2-2)式],因而可直接取电源侧差流数值计算本侧灵敏度,灵敏度指标与电源侧相同。

(2) 相继动作区计算

在差流元件相继动作区边缘发生两相短路时有: $I_{cIN*} = I_{dx*}$,由(1-11)式得出:

$$I_{dx*} = \frac{0.866 l}{(K + l - \frac{l^2}{2}) X_{x1*}} \text{ 其中K值用 } X_{x1.Max*} \text{ 计算。}$$

令 $I_{dx*} X_{xi*} = B$, 移项整理:

$$I_{dx*} X_{xi*} \left(K + l - \frac{l^2}{2} \right) = 0.866l$$

$$\frac{B}{2} l^2 - (B - 0.866) l - BK = 0$$

$$\text{解出 } l = \frac{(B - 0.866) \pm \sqrt{(B - 0.866)^2 + 4 \frac{B^2}{2} K}}{B}$$

$$= \left(1 - \frac{0.866}{B} \right) \pm \sqrt{1 + 2K - \frac{\sqrt{3}}{B} + \frac{0.75}{B^2}} \dots\dots\dots (2-4)$$

取 $0 < l < 1$ 的根

解出的 l 值, 即为受电侧横差保护相继动作区 l_N (靠近 M 侧)。

3. 功率方向元件

(1) 差流元件起动时, 受电侧母线残压用下式计算

$$U_{cYN*}^{(3)} = \frac{(1-l)I_{dx*} X_{xi*}}{2}$$

其中 l 值用 (2-4) 式求得之 l_N 代入

再求出方向元件端子上感受的功率, 确定方向元件能否限制差流元件相继动作区。

(2) 为简化计算, 按本侧线路出口 10% 处 ($l = 0.9$) 三相短路, 计算方向元件流过的差流一次值, 将 $l = 0.9$ 代入 (1-11) 式:

$$I_{c1N*} = \frac{0.9}{\left(K + 0.9 - \frac{(0.9)^2}{2} \right) X_{xi*}} \frac{0.9}{(K + 0.495) X_{xi*}^2}$$

依此计算出方向元件感受差流的二次值 $I_{c1.1}$, 并确定方向元件在该电流下的动作电压 U_{dx*} (查 $P = f(I)$ 曲线) 及其一次动作电压标么值 U_{dx*} 。

在方向元件电压死区边缘发生三相短路有: $U_{dx*} = U_{cYN*}$ 根据 (1-13) 式得出:

$$U_{dx*} = \frac{(1-l)l}{2K + 2l - l^2} \text{ 其中 } K \text{ 值用 } X_{xt.Mdx*} \text{ 计算。}$$

移项整理: $(1 - U_{dx*}) l^2 - (1 - 2U_{dx*}) l + 2KU_{dx*} = 0$

$$\text{解出 } l = \frac{(1 - 2U_{dx*}) \pm \sqrt{(1 - 2U_{dx*})^2 - 8KU_{dx*} (1 - U_{dx*})}}{2(1 - U_{dx*})}$$

$$= \frac{(1 - 2U_{dx*}) \pm \sqrt{1 + 4(1 + 2K)U_{dx*}(U_{dx*} - 1)}}{2(1 - U_{dx*})}$$

取 $0 < l < 1$ 的根

受电侧方向元件死区范围 $l_N = 1 - l$, l_N 的偏差情况说明与电源侧相同, 要求 l_N 应小于线路全长的 10%。

四、电源侧接地横差方向保护定值计算

1. 零序电压闭锁元件

参见图一~图三。

(1) 动作电压按躲正常运行不平衡电压整定, 一般取:

$$U_{0dxj} = 9V \sim 10V \text{ (继电器动作电压)}$$

一次序动作电压标么值: $U_{0dx*} = \frac{U_{0dxj}}{3 \times U_{\phi \Delta}}$

其中 $U_{\phi \Delta}$ 一般为 $100V \sim 195V$

(2) 灵敏度校验

① 线路中点接地短路, 由 (1-2) 及 (1-15) 两式有:

$$X_{1\Sigma 0.5*} = X_{xt.Max*} + 0.375X_{xt*} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$X_{0\Sigma 0.5*} = X_{0xt.Min*} + 0.5X_{0M*} + 0.375(X_{0xt*} - X_{0M*}) \dots\dots\dots (4-2)$$

其中 $X_{0xt.Min*}$: 系统最小零序电源阻抗标么值, 下同。

$$\text{用 } I_{OD*} = \frac{I}{2X_{1\Sigma 0.5*} + 2X_{0\Sigma 0.5*}} \dots\dots\dots (4-3)$$

$$\text{或用 } I_{OD*} = \frac{I}{X_{1\Sigma 0.5*} + 2X_{0\Sigma 0.5*}} \dots\dots\dots (4-4)$$

计算 I_{OD*} 的较小值 $I_{OD.Min*}$

$$\text{母线零序电压: } U_{0M.Min*} = I_{OD.Min*} X_{0xt.Min*} \dots\dots\dots (4-5)$$

$$\text{零序电压元件灵敏度 } K_{lm} = \frac{U_{0M.Min*}}{U_{0dx*}} \geq 2$$

② 受电侧线路出口接地短路, 受电侧开关先切开时有:

$$X_{1\Sigma*} = X_{xt.Max*} + X_{xt*} \dots\dots\dots (4-6)$$

$$X_{0\Sigma*} = X_{0xt.Min*} + X_{0xt*} \dots\dots\dots (4-7)$$

按①中的方法计算接地短路零序电流最小值及母线零序电压最小值, 并求出灵敏度, K_{lm} 应不小于 1.3

2. 零序差流元件

(1) 动作值按躲受电侧母线穿越性接地短路最大不平衡电流计算, 由于有零序电压协同起动回路, 因而动作值不必躲相间短路不平衡电流。

当取差流元件本身动作电流为 I_{0dxj} 时, 其一次零序动作电流标么值用下式计算:

$$I_{0dx*} = \frac{I_{0dxj} \Pi LH}{3 I_B}$$

(2) 灵敏度校验

① 线路中点接地短路灵敏度, 正序及零序综合阻抗按 (4-1) 及 (4-2) 式求出, 但应用系统最大零序电源阻抗 $X_{0xt.Max*}$ 取代 (4-2) 式中的 $X_{0xt.Min*}$ 。再用 (4-3) 式或 (4-4) 式求出最小零序短路电流 $I_{OD.Min*}$

保护流过的零序差流值由 (1-19) 式得:

$$I_{ocIM*} = (1-l) I_{OD.Min*} = 0.5 I_{OD.Min*}$$

$$\text{灵敏度 } K_{lm} = \frac{I_{ocIM*}}{I_{0dx*}} \geq 2$$

② 受电侧出口接地短路, 受电侧开关先切开时, 按 (4-6) 及 (4-7) 两式求出 $X_{1\Sigma*}$ 及 $X_{0\Sigma*}$, 但 (4-7) 式的 $X_{0xt.Min*}$ 应该用 $X_{0xt.Max*}$ 代替, 再求出零序短



路电流最小值计算灵敏度, $K_{lm} \geq 1.3$

(3) 零序差流元件相继动作区

设相继动作区至电源侧母线长度为 l , 距受电侧母线长度为 $(1-l)$ 。
在相继动作区边缘发生接地短路, 由 (1-19) 式可得:

$$I_{oc1*} = I_{odz*} = (1-l) I_{OD*}$$

将 (1-1) 及 (1-16) 两式代入上式, 在单相接地短路时有:

$$I_{odz*} = \frac{(1-l)}{2(X_{xl*Max*} + \frac{l(2-l)}{2} X_{xl*}) + X_{oxl*Max*} + lX_{OM*} + \frac{l(2-l)}{2} (X_{oxl*} - X_{OM*})}$$

移项整理后得出:

$$I_{odz*} (X_{xl*} + 0.5X_{oxl*} - 0.5X_{OM*}) l^2 - [I_{odz*} (2X_{xl*} + X_{oxl*}) + 1] l + [1 - I_{odz*} (2X_{xl*Max*} + X_{oxl*Max*})] = 0$$

令: $A = I_{odz*} (X_{xl*} + 0.5X_{oxl*} - 0.5X_{OM*});$

$B = I_{odz*} (2X_{xl*} + X_{oxl*}) + 1;$

$C = 1 - I_{odz*} (2X_{xl*Max*} + X_{oxl*Max*})$

$$\text{解出 } l = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots\dots\dots (4-8)$$

取 $0 < l < 1$ 的根

M 侧接地横差相继动作区, 靠近 M 侧母线, 其边缘点距 N 母线长度 $l_M = (1-l)$
要求电源侧与受电侧横差相继动作区之和 $l_M + l_N$ 应小于线路全长的 50%

3. 零序功率方向元件

(1) 能否增加零序差流元件相继动作区验算

在零序差流元件起动点有: $I_{odz*} = I_{oc1*} = (1-l) I_{OD*}$ 差流起动点接地短路

零序总电流: $I_{OD*} = \frac{I_{odz*}}{(1-l)}$

式中的 l 用 (4-8) 式的计算结果代入。

此时电源侧母线零序电压:

$$U_{OM*} = I_{OD*} X_{oxl*Min*} = \frac{I_{odz*}}{(1-l)} X_{oxl*Min*}$$

零序方向继电器端子上的零序电压及功率

$$U_{OJ} = 3U_{OM*} U_{\phi \Delta}$$

$$P_{OJ} = U_{OJ} \cdot I_{odz*} = 3I_{odz*} U_{OM*} U_{\phi \Delta}$$

其中 I_{odz*} : 零序差流继电器动作电流。

P_{OJ} 应大于 I_{odz*} 下的方向元件动作功率, 并应有大于 2 的灵敏度。

(2) 线路中点接地短路时的灵敏度, 可利用 (4-1) ~ (4-5) 式得出的有关数值进行计算, 零序方向元件端子上的电压、电流及功率分别为:

$$\text{电压: } U_{OJ} = 3I_{OD \cdot Min} X_{0 \cdot st \cdot Min} U_{\phi} (\Delta)$$

$$\text{电流: } I_{OJ} = \frac{3(1-l)I_{BOD \cdot Min} I}{\Pi_{LH}} = \frac{1.5I_{OD \cdot Min} I_B}{\Pi_{LH}}$$

$$\text{功率: } P_{OJ} = U_{OJ} I_{OJ} = \frac{4.5I_B U_{\phi} \Delta I_{OD \cdot min} X_{0 \cdot st \cdot min}}{\Pi_{LH}} \dots \dots \dots (4-9)$$

在零序方向元件动作特性曲线上查出 I_{OJ} 电流下的继电器动作功率 $P_{0 \cdot dz \cdot j}$, 计算灵敏度:

$$K_{lm} = \frac{P_{OJ}}{P_{0 \cdot dz \cdot j}} \geq 4$$

在(1)、(2)两项计算中, 若零序功率方向元件不能满足要求, 应适当的改变弹簧拉角, 降低动作功率, 但弹簧拉角不宜小于 100° 。

五、受电侧接地横差方向保护计算特点

1. 零序电压闭锁元件

动作值按躲正常运行不平衡电压计算, 求出下述两种情况下的受电侧母线零序电压并依此计算灵敏度。

(1) 线路中点接地短路时的 U_{ON} 计算

利用(4-1)~(4-4)式, 求出的线路中点接地短路的最小零序短路电流值 $I_{OD \cdot Min}$, 考虑(1-17)及(1-18)两式所表示的零序电流分配系数, 并计及平行线间零序互感的影响(参见图四), 求得受电侧母线零序电压为:

$$U_{ON} = I_{OD \cdot Min} \left(X_{\phi \cdot st \cdot Mit} + \frac{l}{2} X_{0 \cdot st} + \frac{l(2-l)}{2} X_{OM} - \frac{l(1-l)}{2} X_{OM} \right)$$

将 $l = 0.5$ 代入上式并加以整理:

$$U_{ON} = 0.25I_{OD \cdot Min} (4X_{0 \cdot st \cdot Min} + X_{0 \cdot st} + X_{OM}) \dots \dots \dots (5-1)$$

(2) 电源侧线路出口接地短路, 电源侧开关又先切开时的 U_{ON} 计算:

$$\text{取 } X_{1 \cdot Z} = X_{xt \cdot Max} + 2X_{\pi} \dots \dots \dots (5-2)$$

$$X_{0 \cdot Z} = X_{0 \cdot st \cdot min} + 2(X_{0 \cdot st} - X_{OM}) \dots \dots \dots (5-3)$$

计算接地短路最小零序短路电流 $I_{OD \cdot Min}$

受电侧母线零序电压:

$$U_{ON} = I_{OD \cdot Min} (X_{0 \cdot st \cdot Min} + X_{0 \cdot st} - X_{OM})$$

(1)、(2)两项灵敏度指标与电源侧零序电压元件相同。

2. 零序差流元件

(1) 灵敏度校验特点:

比较(1-19)和(1-20)两式, 在 $l = 0.5$ 时电源侧和受电侧零序差流 $I_{0 \cdot \Delta}$ 相等, 所以线路中点接地灵敏度计算与电源侧零序差流元件相同。

电源侧线路出口接地短路, 电源侧开关又先切开情况下的最小零序短路电流 $I_{OD \cdot Min}$,

应取(5-2)式及(5-3)式正序及零序综合阻抗计算,但(5-3)式中的 $X_{x1 \cdot \text{min}}$ 应用 $X_{x1 \cdot \text{Max}}$ 替换。

零序差流元件流过的差流一次标么值:

$$I_{oc1*} = 2I_{OD \cdot \text{Min}}$$

两种情况下灵敏度指标的要求与电源侧零序差流元件相同。

(2) 相继动作区计算

利用 $I_{oc1*} = I_{dx*} = II_{OD}$ 关系式,在单相接地时得出关于 l 的一元二次方程:

$$I_{dx*} (X_{x1*} + 0.5X_{x1*} - 0.5X_{OM*}) l^2 - [I_{dx*} (2X_{x1*} + X_{x1*}) - 1] l - I_{dx*} (2X_{x1 \cdot \text{Max}} + X_{x1 \cdot \text{Max}}) = 0 \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

解出 l ,即为受电侧零序差流元件相继动作区 l_N (靠近M侧)。

3. 零序功率方向元件

(1) 能否增加零序差流元件相继动作区校验

当零序差流起动点接地短路时,总的零序短路电流:

$$I_{OD*} = \frac{I_{oc1N*}}{l} = \frac{I_{dx*}}{l} \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

受电侧母线零序电压为(见图四):

$$U_{ON*} = I_{OD*} X_{ox1 \cdot \text{Min}} + \frac{I_{oc1N*} X_{ox1*}}{2} + (I_{OD*} - \frac{I_{oc1N*}}{2}) l X_{OM*} - \frac{I_{oc1N*}}{2} (1-l) X_{OM*}$$

将(5-5)式关系代入上式,

整理后得:

$$U_{ON*} = \frac{I_{dx*}}{l} \left[X_{ox1 \cdot \text{Min}} + \frac{l}{2} X_{ox1*} + \left(l - \frac{l}{2} \right) X_{OM*} \right] = I_{dx*} \left[\frac{X_{ox1 \cdot \text{Min}}}{l} + \frac{l}{2} (X_{ox1*} + X_{OM*}) \right]$$

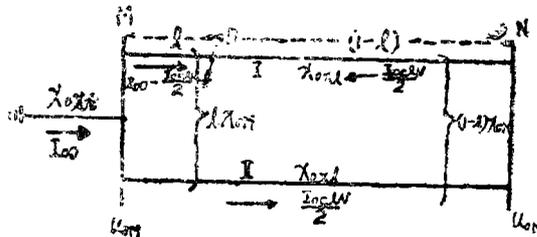
其中 l 可用(5-4)式求出的 l 值代入计算。

计算出 U_{ON*} 后,再利用电源侧零序方向元件能否增加零序差流元件相继动作区的校验方法,校验本侧零序方向元件性能。

(2) 线路中点接地短路灵敏度校验

校验可直接取由(4-1)~(4-4)式计算出的零序总电流 $I_{OD \cdot \text{Min}}$,此时受电侧感受的差流为:

$$I_{oc1N*} = II_{OD \cdot \text{Min}} = 0.5I_{OD \cdot \text{Min}}$$



图四 电源侧附近接地零序电流电压分布图

M母线 $U_{OM} = I_{OD} \cdot X_{ox1}$

线路II零序压降 $U_{OII} = \frac{I_{oc1N}}{2} X_{ox1}$

线路I在线路II上的零序互感电压降 l 段内为正

$$\left(I_{OD} - \frac{I_{oc1N}}{2} \right) \cdot l \cdot X_{OM}$$

$(1-l)$ 段内为负 $-\frac{I_{oc1N}}{2} \cdot (1-l) \cdot X_{MO}$

受电侧母线零序电压用(5-1)式计算,零序方向元件感受的功率为:

$$P_{0J} = U_{0J} I_{0J} = 3U_{ON} U_{\phi-\phi} \cdot \frac{3I_{ocIN} I_B}{\Pi_{LH}}$$

$$= \frac{1}{\Pi_{LH}} [1.125 U_{\phi-\phi} I_{OD.M}^2 I_B (4X_{0.N.M} + X_{0.M} + X_{0.M})]$$

依此计算零序方向元件灵敏度,其指标要求与电源侧相同。

六、横差方向保护定值计算中有关问题说明

1. 平行线应实测其正序阻抗、零序阻抗及零序互感抗,作为定值计算的基本数据。当两回线阻抗相差过大(例如差流系数超过5%),使用文中的某些公式要引起明显的误差。

2. 线路两侧接地和相间横差方向保护的电流、电压元件,对线路中点的灵敏度按要求应不小于2(零序方向元件应不小于4)。若不能满足要求时,则应保证在线路两侧开关均未断开时,其中一侧有不小于2的灵敏度(零序方向元件应不小于4);而在另一侧开关切开后,另一侧对线路末端的灵敏度应不低于1.3(零序方向元件不低于2)。相间和接地方向元件还要求不增加差流元件相继动作区。若保护不能满足要求则应采取**措施**。例如用BCH-2型继电器作差流元件,即可平衡两回线外部故障时的差流(当差流系数较大时进行补偿),又有较好的躲短路初瞬非周期分量的性能,从而降低了差流元件的动作值;感应型方向元件除适当的改变弹簧拉角降低动作功率外,尚可更换动作功率较小的整流型方向继电器,以提高方向元件的灵敏度。

当使用半导体方向元件时,由于其动作功率较小,可不必校验能否限制差流元件相继动作区。

3. 若采用相间方向元件电压死区补偿装置,或使用LG-11/5型带记忆方向元件,则方向元件死区可不必进行计算。