

小接地电流系统单相接地 微机保护中的两种选线方法*

郭嘉琳

(郑州工学院计自系)

摘 要: 本文介绍某大型化肥厂6kV中性点不接地供电网络单相接地微机保护中应用的基波零序电流方向、异相电流增量差值等两种选线方法的基本原理, 选线判据, 程序框图设计, 应用特点, 具有一定的实用价值与普遍意义。

关键词: 单相接地, 选线, 零序电流方向, 增量差值

中国分类号: TM77

某大型化肥厂 110 / 6kV 总降压变电所中装设两台 SFZ₇-16000 / 110 型有载调压主变压器, Y / Δ 接线, 110kV 侧中性点不接地。全厂共有 5 个 6 / 0.4kV 车间变电所。

其 6kV 供电网络单相接地微机保护由故障性质辨识、判相、选线、测距等功能模块组成, 并辅以音响报警、屏幕显示、打印等多种动态显示手段。鉴于该厂 6kV 供电网络属于较典型的中性点不接地、两级放射式小接地电流系统, 故在选线模块中分别采用了基波零序电流方向、异相电流增量差值两种选线方法。

1 基波零序电流方向选线方法

由文献〔1〕知, 中性点不接地电网单相接地时的电压、电流特点如下:

①故障相对地电压显著降低(直到为 0), 非故障相对地电压升高(直至接近或略高于线电压), 电网中出现零序电压;

②非故障线路三倍零序电流 $3I_0$ 的大小等于本线路的接地电容电流, 故障线路 $3I_0$ 的大小等于所有非故障线路的接地电容电流之和;

③非故障线路的零序电流相位超前零序电压约 90° , 故障线路的零序电流相位滞后零序电压约 90° ;

④接地故障处的电流大小等于所有故障线路与非故障线路接地电容电流的总和。

由文献〔2〕、〔3〕知, 在小接地电流电网单相接地稳态下, 零序电流中的基波分量总

* 收稿日期: 1994-02-23

是远大于其它高次谐波分量。

考虑到该厂许多变电所 6kV 母线段的出线回数较少 (4~5 回)、线路长度悬殊较大 (30~670m), 且最小运行方式下全网的总接地电容电流较小 ($<5\text{A}$), 某些变电所的接线则较为复杂, 简单的零序电流选线方法难以满足选择性、灵敏度的要求, 故宜采用基波零序电流方向等选线方法。

1.1 基波零序电压、电流的计算方法

单相接地稳态下, 零序电压、电流的数学描述 $f(t)$, 都属于非正弦周期时变函数, 可以用付立叶级数表示为:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (1)$$

式中 A_0 ——直流分量, 且 $A_0 = a_0$;

k ——谐波分量的谐波次数;

A_{km} —— k 次谐波的幅值, 且 $A_{km} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$;

ψ_k —— k 次谐波的初相角, 且 $\psi_k = \tan^{-1} \frac{b_k}{a_k}$;

a_k —— k 次谐波的余弦系数, 且 $a_k = A_{km} \cdot \sin \psi_k$;

b_k —— k 次谐波的正弦系数, 且 $b_k = A_{km} \cdot \cos \psi_k$ 。

当用计算机对离散型采样信号进行计算时, 若每一个周期中的采样次数为 N , 采样顺序自 $M = 0 \sim (N-1)$, 则有:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{M=0}^{(N-1)} f\left(M \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \cdot \cos\left(k \cdot M \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{M=0}^{(N-1)} f\left(M \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \cdot \sin\left(k \cdot M \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3)$$

为了准确、方便地求取 $k=1$ 时的零序电压与零序电流基波分量, 可取 $N=12$, 则:

$$a = \frac{2}{12} \sum_{M=0}^{11} f\left(M \cdot \frac{\pi}{6}\right) \cdot \cos\left(M \cdot \frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{6} [(f_0 - f_6) + \frac{1}{2}(f_2 - f_4 - f_8 + f_{10}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(f_1 - f_5 - f_7 + f_{11})] \quad (4)$$

$$b = \frac{2}{12} \sum_{M=0}^{11} f\left(M \cdot \frac{\pi}{6}\right) \cdot \sin\left(M \cdot \frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{6} [(f_3 - f_9) + \frac{1}{2}(f_1 + f_5 - f_7 - f_{11}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(f_2 + f_4 - f_8 - f_{10})] \quad (5)$$

式 (4)、(5) 中, $f_0 \sim f_{11}$ 分别为 $M=0 \sim 11$ 次采样时的零序电压或零序电流瞬时值。

滤去直流分量后, 单相接地稳态下用付氏系数表达的基波零序电压、电流分别为:

$$u_0 = U_{0c} \cdot \cos \omega t + U_{0s} \cdot \sin \omega t \quad (6)$$

$$i_0 = I_{0c} \cdot \cos \omega t + I_{0s} \cdot \sin \omega t \quad (7)$$

式中 $U_{\alpha, c} = U_{\alpha m} \sin \phi_{U_0}$ ——基波零序电压的余弦系数 (8)

$U_{\alpha, s} = U_{\alpha m} \cdot \cos \phi_{U_0}$ ——基波零序电压的正弦系数 (9)

$I_{\alpha, c} = I_{\alpha m} \sin \phi_{I_0}$ ——基波零序电流的余弦系数 (10)

$I_{\alpha, s} = I_{\alpha m} \cos \phi_{I_0}$ ——基波零序电流的正弦系数 (11)

1.2 基波零序电流方向选线方法的动作方程

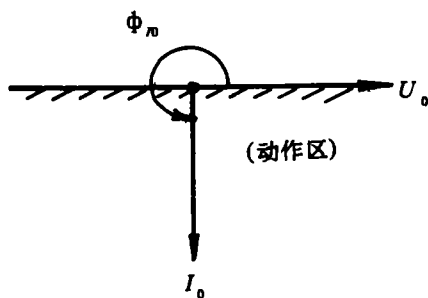
如前所述, 单相接地时, 故障线零序电流滞后零序电压约 90° 。若以母线零序电压 U_0 为参考相量, 则在极坐标系中, U_0 与故障线零序电流 I_0 间的相位关系及零序电流方向选线元件的动作区 (阴影线侧) 如图1所示。与此相应的动作方程为

$$180^\circ < \arg \frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} < 360^\circ \quad (12)$$

$$\text{或 } I_m \frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} < 0 \quad (13)$$

式(13)中, 符号 ' I_m ' 表示取其 '虚部'。

图1 零序电流方向选线方法的动作区



由式(13)知应有 $\sin(\phi_{I_0} - \phi_{U_0}) = (\sin \phi_{I_0} \cdot \cos \phi_{U_0} - \cos \phi_{I_0} \cdot \sin \phi_{U_0}) < 0$

两侧均乘以 $U_0 I_0$, 并引入式(8)~(11)可得:

$$(I_0 \sin \phi_{I_0} \cdot U_0 \cos \phi_{U_0} - I_0 \cos \phi_{I_0} \cdot U_0 \sin \phi_{U_0}) = (I_{\alpha, c} \cdot U_{\alpha, s} - I_{\alpha, s} \cdot U_{\alpha, c}) < 0$$

故当对零序电压、电流的离散型采样信号采用全波付氏系数算法时, 基波零序电流方向选线方法的动作方程 (或称 '判据') 为:

$$(U_{\alpha, s} \cdot I_{\alpha, c} - U_{\alpha, c} \cdot I_{\alpha, s}) < 0 \quad (14)$$

1.3 提高选线可靠性的辅助措施

① 适当展宽采样数据窗口 —— 例如, 在每周期全波采样 12 点的基础上, 将采样数据窗口展宽至 14 点, 并相应进行移动数据窗口的付氏系数计算、比较;

② 增设基波零序电流幅值比较环节 —— 即当首先查明某线路满足动作方程式 (14) 后, 再进一步检验其是否满足幅值条件:

$$I_{\alpha m} \geq \sqrt{2} I_{dz} \quad (15)$$

式中的动作电流 I_{dz} , 可按简单零序电流保护进行整定计算:

$$I_{dz} = K_k \cdot 3 U_\phi \omega C_n \quad (16)$$

式中 K_k ——可靠系数, 可取为 1.5~2.0; ω ——角频率;

U_ϕ ——相电压; C_n ——本线路对地电容。

1.4 程序框图设计

其原理性程序框图可如图 2 所示。图中, N 为线路回数。

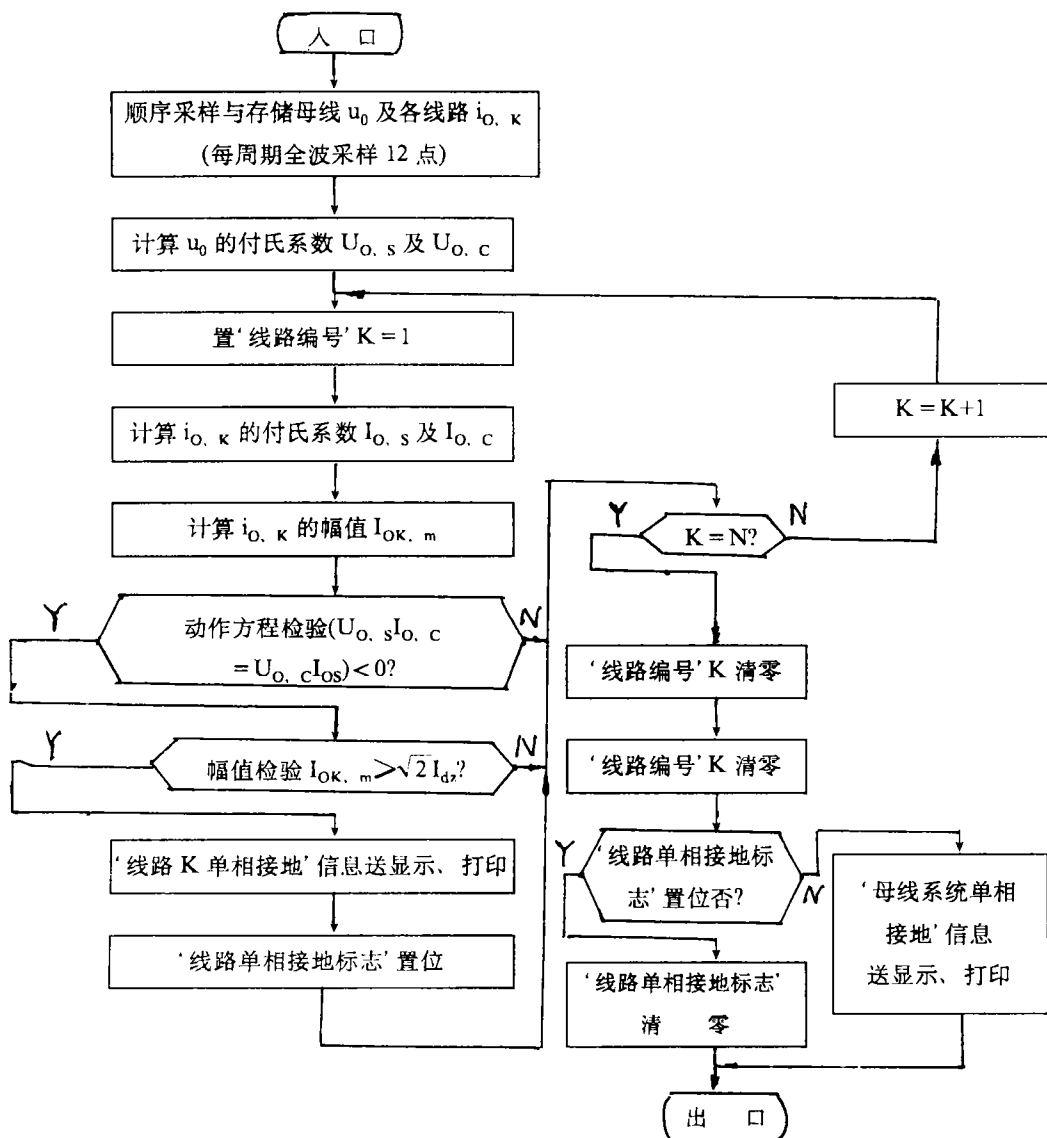


图 2 基波零序电流方向选线模块原理性程序框图

1.5 小结

在出线回数不多, 且线路长度悬殊较大, 全网总接地电容电流较小, 或网络接线较为复杂的中性点不接地系统中, 此选线方法具有足够的准确性, 计算工作量也不太大。特别适用于出线装设有零序 CT 的场合。

2 异相电流增量差值选线方法

2.1 中性点不接地系统单相接地前后各相电压、电流的特点

设在图 3 所示中性点不接地系统中, 共有 N 回出线, $C_{oi}(i=1\sim N)$ 为线路对地电

容, 电源电压 E 、各出线参数及负荷均三相对称。

2.1.1 单相接地前的各相电压、电流

单相接地前正常运行时的各相电压、电流相量图见图 4。其中, 各相对地电压为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C , 第 i 回出线各相总电流、负荷电流、电容电流分别为 \dot{I}_{Ai} 、 \dot{I}_{Bi} 、 \dot{I}_{Ci} , $\dot{I}_{AL, i}$ 、 $\dot{I}_{BL, i}$ 、 $\dot{I}_{CL, i}$ 及 $\dot{I}_{A, C_{0i}}$ 、 $\dot{I}_{B, C_{0i}}$ 、 $\dot{I}_{C, C_{0i}}$, 均为三相对称, 且:

$$\begin{cases} \dot{I}_{Ai} = \dot{I}_{AL, i} + \dot{I}_{A, C_{0i}} \\ \dot{I}_{Bi} = \dot{I}_{BL, i} + \dot{I}_{B, C_{0i}} \\ \dot{I}_{Ci} = \dot{I}_{CL, i} + \dot{I}_{C, C_{0i}} \end{cases} \quad (i = 1 \sim N) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } |\dot{I}_{AL, i}| &= |\dot{I}_{BL, i}| = |\dot{I}_{CL, i}| \\ |\dot{I}_{A, C_{0i}}| &= |\dot{I}_{B, C_{0i}}| = |\dot{I}_{C, C_{0i}}| = \omega C_{0i} E \end{aligned}$$

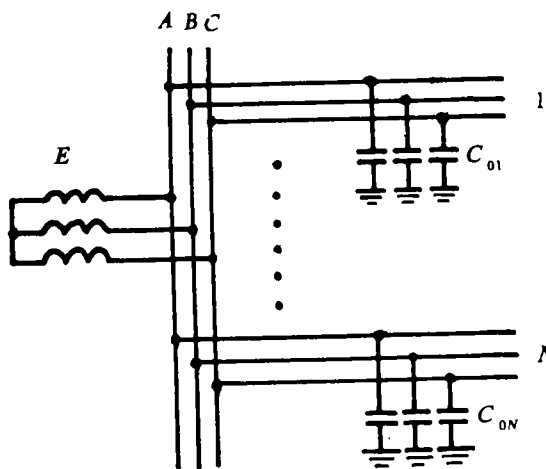


图3 中性点不接地系统接线示意

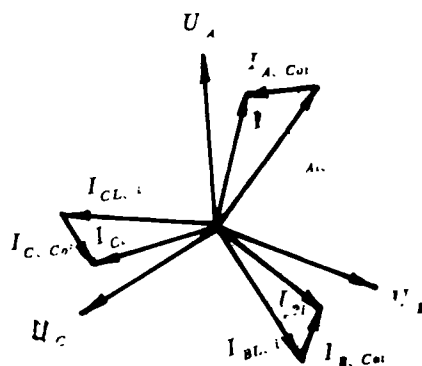


图4 单相接地前的电压、电流相量图

2.1.2 单相接地后的各相电压、电流

设第 G 回出线的 A 相发生完全金属性单相接地, 则 A 相对地电压降为 $|\dot{U}_A| = 0$, B 、 C 两相对地电压升高至 $|\dot{U}_B| = |\dot{U}_C| = \sqrt{3} E$, 各线路 A 相对地电容电流 $\dot{I}_{A, C_{0i}}$ 均为 0。此时:

① 接地线电压、电流相量图

由图5可知接地线 G 的各相电流分别为:

$$\begin{cases} \dot{I}'_{AG} = \dot{I}_{AL, G} + \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{B, C_{0i}} + \dot{I}_{C, C_{0i}}) \\ \dot{I}'_{BG} = \dot{I}_{BL, G} + \dot{I}_{B, C_{0G}} \\ \dot{I}'_{CG} = \dot{I}_{CL, G} + \dot{I}_{C, C_{0G}} \end{cases} \quad (G \in 1 \sim N) \quad (18)$$

②非接地线电压、电流相量图

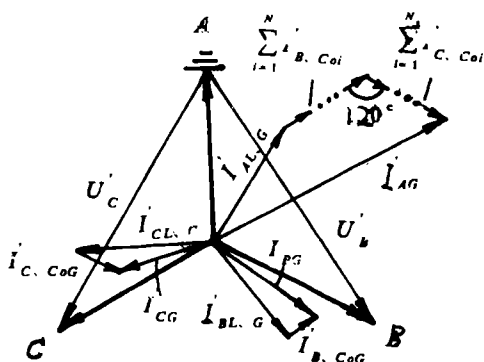


图5 接地线电压、电流相量图

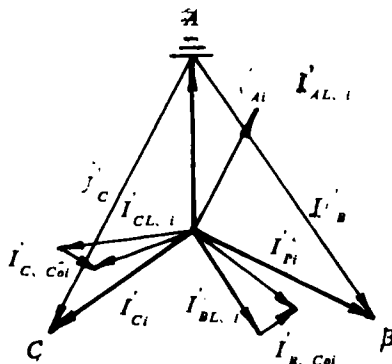


图6 非接地线电压、电流相量图

由图6可知非接地线的各相电流分别为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{Ai} = \dot{I}_{AL, i} \\ \dot{I}_{Bi} = \dot{I}_{BL, i} + \dot{I}_{B, C_{oi}} \\ \dot{I}_{Ci} = \dot{I}_{CL, i} + \dot{I}_{C, C_{oi}} \end{cases} \quad (i = 1 \sim N, \text{ 但 } i \neq G) \quad (19)$$

式 (18)、(19) 中, $|\dot{I}_{B, C_{oi}}| = |\dot{I}_{C, C_{oi}}| = \omega C_{oi} |\dot{U}_B| = \omega C_{oi} |\dot{U}_C|$

$$= \sqrt{3} \cdot \omega C_{oi} E, \quad \left| \sum_{i=1}^N (\dot{I}_{B, C_{oi}} + \dot{I}_{C, C_{oi}}) \right| = 3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E.$$

2.1.3 单相接地前后的异相电流增量差值

上述式 (17) ~ (19) 中之各电流均为线路电流互感器 (CT) 一次侧的实际电流, 而单相接地保护直接测量到的则是 CT 的二次侧电流, 两者之间存在着 CT 变比 K 的换算关系及 CT 误差 (含电流误差、相位误差) 的影响。通常用准确级 n 来代表 CT 在规定工作条件下的最大电流误差和相位误差。

设: ① 每回出线中的各相 CT 变比均为 K ; ② 在分别测量单相接地前后各相电流变化的很短时间间隔中, CT 的运行工况不变, 即其电流误差、相位误差不变; ③ 在上述时间间隔中, 各线路的负荷电流分量不变, 即 $\dot{I}_{AL, i} = \dot{I}_{AL, i}, \dot{I}_{BL, i} = \dot{I}_{BL, i}, \dot{I}_{CL, i} = \dot{I}_{CL, i}$ (注: 可以证明, 即使计及负荷电流的可能变化, 亦不影响此选线方法的正确性)。

则在单相接地前后的 CT 二次侧各相电流增量, 可分别利用式 (17)~(19)、并引入 CT 变化 K 求得:

$$\text{接地线} \begin{cases} \Delta I_{AG} = K_{AG} |\dot{I}_{AG} - \dot{I}_{AG}| = K_{AG} [3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - \omega C_{oG} E] \\ \Delta I_{BG} = K_{BG} |\dot{I}_{BG} - \dot{I}_{BG}| = K_{BG} \omega C_{oG} E \\ \Delta I_{CG} = K_{CG} |\dot{I}_{CG} - \dot{I}_{CG}| = K_{CG} \omega C_{oG} E \end{cases} \quad (G \in 1 \sim N) \quad (20)$$

$$\text{非接地线} \begin{cases} \Delta I_{Ai} = K_{Ai} |\dot{I}_{Ai} - \dot{I}_{Ai}| = K_{Ai} \omega C_{oi} E \\ \Delta I_{Bi} = K_{Bi} |\dot{I}_{Bi} - \dot{I}_{Bi}| = K_{Bi} \omega C_{oi} E \\ \Delta I_{Ci} = K_{Ci} |\dot{I}_{Ci} - \dot{I}_{Ci}| = K_{Ci} \omega C_{oi} E \end{cases} \quad (i = 1 \sim N, i \neq G) \quad (21)$$

与此相应, 单相接地前后的 CT 二次侧异相电流增量差值分别为:

$$\text{接地线} \begin{cases} \Delta I_{AB, G} = \Delta I_{AG} - \Delta I_{BG} = K_{AG} [3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - \omega C_{oG} E] - K_{BG} \omega C_{oG} E \\ \Delta I_{BC, G} = \Delta I_{BG} - \Delta I_{CG} = (K_{BG} - K_{CG}) \omega C_{oG} E \\ \Delta I_{CA, G} = \Delta I_{CG} - \Delta I_{AG} = \{K_{AG} [3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - \omega C_{oG} E] - K_{CG} \omega C_{oG} E\} \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{非接地线} \begin{cases} \Delta I_{AB, i} = \Delta I_{Ai} - \Delta I_{Bi} = (K_{Ai} - K_{Bi}) \omega C_{oi} E \\ \Delta I_{BC, i} = \Delta I_{Bi} - \Delta I_{Ci} = (K_{Bi} - K_{Ci}) \omega C_{oi} E \\ \Delta I_{CA, i} = \Delta I_{Ci} - \Delta I_{Ai} = (K_{Ci} - K_{Ai}) \omega C_{oi} E \end{cases} \quad (23)$$

2.2 异相电流增量差值选线判据

(20)~(23) 式表明, 一方面它们可以把单相接地前后数值变化不大的电容电流过滤与突出出来, 另一方面又可计及 CT 变比 K 与电流误差的影响。

设: ① 第 G 回线路发生单相接地; ② 故障相为 ' F ', 非故障相为 ' N '; ③ 每回线路中的各相 CT 变比均为 K_i , 准确级均为 n_i , 但他们在实际运行中的电流误差将可能在 $\pm n_i\%$ 范围内变化, 即其变比将可能在 $K_i(1 \pm n_i\%)$ 范围内变化。

下面分析接地线、非接地线中异相电流增量差值的变化情况。

① 接地线

由 (22) 式知, 实际运行中, 在反映总接地电容电流的故障相 CT 出现最大负误差, 反映本相对地电容电流的非故障相 CT 出现最大正误差的极端情况下, 接地线故障相 F 与任一非故障相 N 间的异相电流增量差值将为其最小值, 即:

$$\begin{aligned} \Delta I_{FN, G, \min} &= K_G (1 - n_G\%) [3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - \omega C_{oG} E] - K_G (1 + n_G\%) \omega C_{oG} E \\ &= K_G [(1 - n_G\%) 3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - 2 \omega C_{oG} E] \end{aligned} \quad (24)$$

一般情况下 $\Delta I_{FN, G} \geq \Delta I_{FN, G, \min}$

② 非接地线

由式 (23) 知, 实际运行中在故障相 CT 出现最大正误差, 非故障相 CT 出现最大负误差的极端情况下, 故障相与任一非故障相间的异相电流增量差值将为其最大值, 即:

$$\begin{aligned}\Delta I_{FN, i, \max} &= [K_i(1+n_i\%) - K_i(1-n_i\%)] \cdot \omega C_{oi} E \\ &= 2n_i\% K_i \omega C_{oi} E; \quad (i=1 \sim N; i \neq G)\end{aligned}\quad (25)$$

一般情况下 $\Delta I_{FN, i} \leq \Delta I_{FN, i, \max}$

比较 (24)、(25) 两式, 可知接地线故障相与任一非故障相间的异相电流增量差值将远大于非接地线者。因此, 当单相接地微机保护的判相模块已判明接地相 (F) 后, 便可进而分别计算所有 N 回线路的故障相 (F) 与任一非故障相 (N) 间的异相电流增量差值 $\Delta I_{FN, i}$, 其中数值最大的第 G 回线路即为接地线。据此导出的异相电流增量差值选线判据为:

$$G \in \max\{\Delta I_{FN, i}\}; \quad (i=1 \sim N, G \in i) \quad (26)$$

2.3 母线系统接地判据

小接地电流系统中的单相接地点可能位于某回出线中, 也可能位于母线系统中。当母线系统单相接地时, 所有 N 回出线均为非接地线, 则由式 (25) 知应有:

$$\max\{\Delta I_{FN, i}\} \leq 2n_i\% K_i \cdot \max\{\omega C_{oi} E\} \quad (27)$$

计入可靠系数 $K_K = 2.0$, 则由式 (27) 可导出母线系统接地判据为:

$$\max\{\Delta I_{FN, i}\} < 4n_i\% K_i \max\{\omega C_{oi} E\} \quad (28)$$

式 (27)、(28) 中, $\max\{\omega C_{oi} E\}$ 为 N 回出线中最大一回对地电容电流。

2.4 灵敏度分析

定义灵敏系数为

$$\begin{aligned}K_{lm} &= \frac{\Delta I_{FN, G, \min}}{\Delta I_{FN, i, \max}} = \frac{K[(1-n\%)3 \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - 2\max\{\omega C_{oG} E\}]}{2n\% K \cdot \max\{\omega C_{oi} E\}} \\ &= \left[\frac{3(1-n\%) \sum_{i=1}^N \omega C_{oi} E - 2\max\{\omega C_{oG} E\}}{2\max\{\omega C_{oi} E\}} \right] > \left[\frac{3(1-n\%) - 2}{2n\%} \right] \\ &= \left[\frac{100 - 3n}{2n} \right]\end{aligned}\quad (29)$$

若分别取 $n = 0.5, 1, 3, 10$, 则相应的 $K_{lm} > 98.5, 48.5, 15.2, 3.5$ 。可见该判据具有相当高的灵敏度, 且 CT 准确级 n 愈高 (即 n 值愈小), 灵敏度亦愈高。

2.5 电流检测与计算方法

① 单相接地前后, 所有 N 回出线的各相电流增量均必须采用相量计算方法。为此, 在正常运行中, 应每隔 0.1s 左右对全部电流进行周期性巡回全波交流采样, 并作追忆存储、滚动刷新, 以备计算接地前各相电流相量 \dot{I}_i 。当判定发生单相接地后, 再对全部电流进行一轮全波交流采样, 以备计算接地后各相电流相量 \dot{I}'_i 。进而即可求得接地前后的相电流增量 $\Delta I_i = |\dot{I}'_i - \dot{I}_i|$ 。

② 单相接地前后, 所有 N 回出线的异相电流增量差值均可采用标量计算方法, 即 $\Delta I_{FN, i} = \Delta I_{F, i} - \Delta I_{N, i}$ 。

③ 当各回路仅 A 、 C 相装有 CT ，且已判定 B 相为接地相时，为了应用异相电流增量差值选线判据式 (26)，可由关系式 $\dot{I}_B = -(\dot{I}_A + \dot{I}_C)$ 求得 B 相电流相量。

2.6 程序框图设计

其原理性程序框图可如图 7 所示。

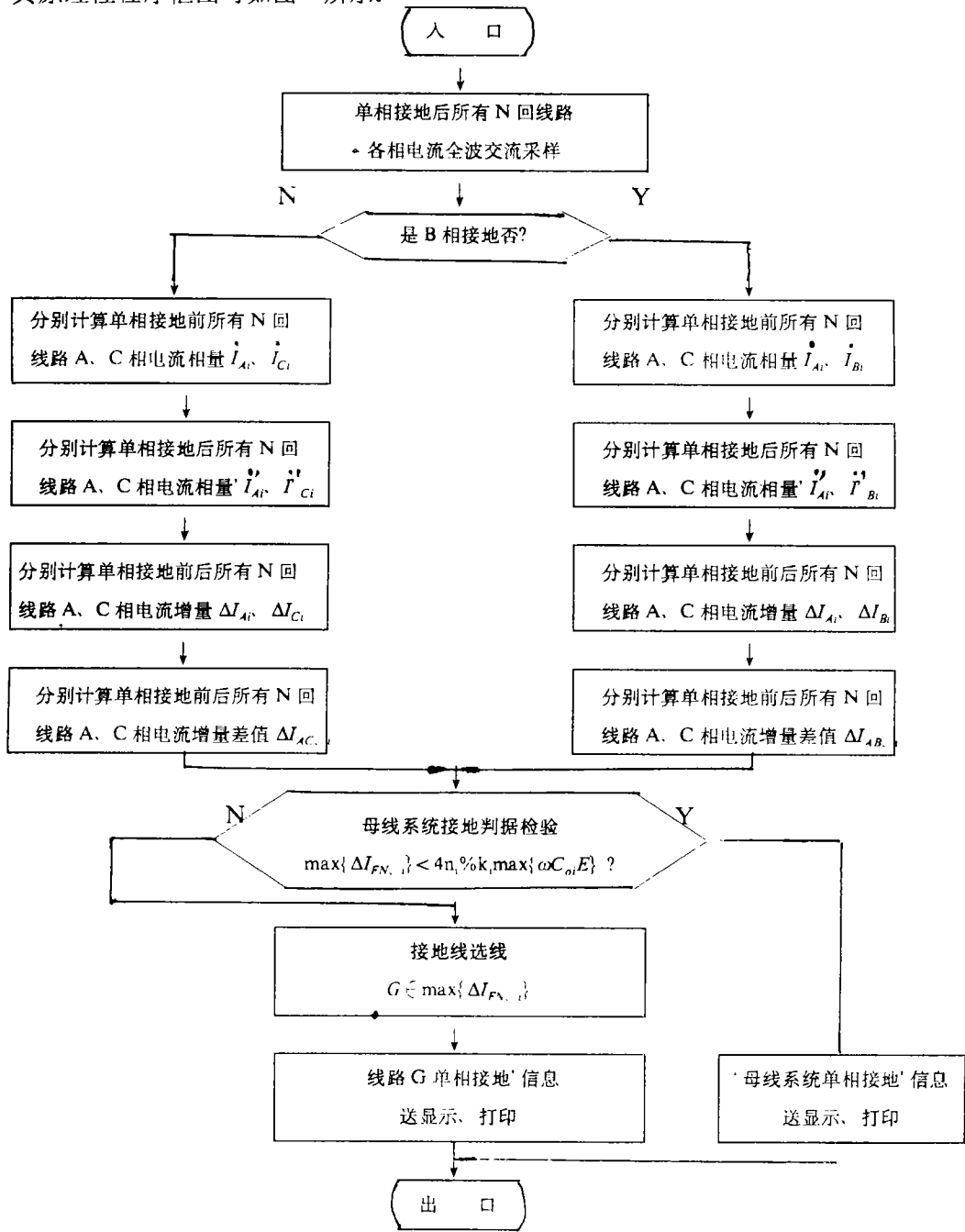


图 7 异相电流增量差值选线模块原理性程序框图

2.7 小 结

此选线方法可过滤与突出单相接地前后电容电流的变化,并可计及 CT 变比 K 与电流误差、运行工况的影响,具有很高的选线灵敏度;并特别适用于出线未装设零序 CT 的场合。可以证明,它也可用于中性点经消弧线圈接地系统。但在单相接地前后,必须对全部相电流周期性巡回交流全波采样,计算工作量也较大些。

参 考 文 献

- 1 山东工学院编. 电力系统继电保护. 水利电力出版社;
- 2 黄耀文等. 上海石化总厂热电厂 10kV 直配系统单相接地试验介绍. 1988 年 8 月
- 3 华东电力试验研究所. 上海石化总厂热电厂 10kV 系统单相接地试验谐波分析试验报告. 1987 年 8 月.
- 4 冯伟江, 胡敏英. 确定小电流接地系统单相接地线的理论分析. 电力自动化设备. 1991 年 1 月

Two Methods of Line Selection for the Microcomputer Protection of Grounded Fault of Single Phase in Small Grounded Current Systems

Guo Jialin

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: This paper introduces the fundamental principle, the criterion, the programming flowchart and the application characteristic for two methods of line selection, which are the fundamental harmonic zero-phase-sequence current direction method and the out of phase current incremental difference method. Both of them are used in the microcomputer protection of grounded fault of Single phase within the 6 kV supply network with unearthed neutrals of a large fertilizer manufacturer. they are also two practical methods and have general meaning.

Keywords: grounded fault of single phase, line Selection, zero-phase-sequence current direction, incremental difference.