

工频突变量电流比选相元件的研究

华北电力学院 张 举

摘要

本文研究提出了一种工频突变量电流比选相元件。文中对选相元件的动作判据进行了分析。提出了改善灵敏度、防止非故障相误动的方法。给出了选相元件的逻辑框图。该选相元件不需滤序，不必判断相位，因而具有编程简单，动作速度快，判据明确且不受过渡电阻影响的特点。对电流比选相元件，由EMPT程序进行了数字仿真，仿真结果进一步验证了理论分析的正确性。

一 前 言

众所周知，在220kV及其以上的高压电网中，为了实现单相故障时跳单相，多相故障时跳三相的要求，必须有选相元件。以往，多采用接地阻抗继电器作为选相元件。之后又研究了电压比选相元件、相电流差突变量选相元件。在数字保护中，选相元件一般是由软件来实现的。这就给选相元件的实现带来了很大的灵活性。在数字保护中，非常容易获得电压或电流的突变量。因此研究了许多反应突变量的选相元件。

对于数字式距离保护，选相元件应能准确判断出各种故障类型和故障相别，以便保护程序取相应的电压、电流组合进行阻抗计算。对于零序电流和高频保护，选相元件的任务是只要正确判断出单相故障时的故障相即可，单相故障时只切除故障相，而其它故障时则切除三相。

因此对数字式保护中的选相元件提出如下要求：①必须保证正确地判断出故障类型和故障相别。②算法尽可能简单，判据明确。③占用数据窗短，选相元件动作速度快，以缩短保护动作时间。

本文在分析了故障特征的基础上提出了一种反应工频相电流突变量与零序电流突变量之比值的选相元件。在逻辑设计时，先以有无零序分量判断是接地故障还是相间故障。当接地故障时，由该电流比选相元件判别出单相接地还是两相接地，并能判断出故障相别。该元件不反应正序或负序电流，因而不需滤序，而零序电流可直接取零序电流采样通道。因为该元件只反应突变量电流的幅值比，所以可采用半周积分法求出突变量电流幅值，经过简单的逻辑判断即可确定故障相。仿真试验说明，该元件可作为数字式零序电流保护或高频保护中的选相元件。

二 相电流突变量电流比选相元件的判据分析

该元件是基于反应相电流突变量(不含负荷电流)与零序电流突变量幅值之比的原理构成。当 $|\Delta I_A|$ (或 $|\Delta I_B|$ 、 $|\Delta I_C|$)与 $|\Delta 3 I_0|$ 之比值K大于一定值时,即判该相为故障相。为书写简便,以下均记为 I_A 、 I_B 、 I_C 、 $3 I_0$,而实际均指突变量。

设系统图如图1所示,为一双侧电源系统。

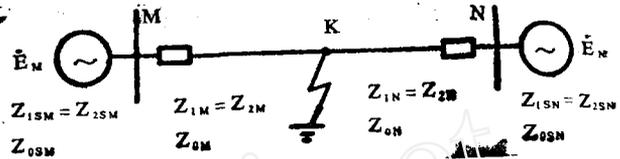


图 1

$$Z_{1\Sigma} = (Z_{1SM} + Z_{1M}) // (Z_{1SN} + Z_{1N})$$

$$Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$$

$$Z_{0\Sigma} = (Z_{0SM} + Z_{0M}) // (Z_{0SN} + Z_{0N})$$

$$C_{1M} = C_{2M} = \frac{Z_{1N} + Z_{1SN}}{Z_{1SM} + Z_{1M} + Z_{1N} + Z_{1SN}}$$

$$C_{0M} = \frac{Z_{0N} + Z_{0SN}}{Z_{0SM} + Z_{0M} + Z_{0N} + Z_{0SN}}$$

C_{1M} 为M侧正序电流分配系数。

C_{0M} 为M侧零序电流分配系数。

(一)当在线路MN上K点发生单相金属性接地时,设为A相接地,则:

$$I_A = 3 I_0 = \frac{3 E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (1)$$

M侧各序电流分别为:

$$I_{A1M} = C_{1M} I_{A1} = C_{1M} \frac{E_{1\Sigma}}{2 Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (2)$$

$$I_{A2M} = C_{2M} I_{A2} = C_{1M} \frac{E_{1\Sigma}}{2 Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (3)$$

$$I_{A0M} = C_{0M} I_{A0} = C_{0M} \frac{E_{1\Sigma}}{2 Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (4)$$

当 $C_{0M} = C_{1M}$ 时有:

$$K_A = \left| \frac{I_{AM}}{3 I_{0M}} \right| = 1$$

对于非故障的B相、C相,当 $C_{0M} = C_{1M} = C_{2M}$ 时, $I_{BM} = I_{CM} = 0$

$$\text{因而 } K_B = \left| \frac{I_{BM}}{3 I_{0M}} \right| = 0 \quad K_C = \left| \frac{I_{CM}}{3 I_{0M}} \right| = 0$$

同理,当B相单相接地时有 $K_B = 1$, C相接地时 $K_C = 1$ 。非故障相的电流比总为

0.

(二) 当在MN线路上K点两相接地短路时

设在K点发生B、C两相金属性接地短路, 则:

$$I_{A1} = \frac{E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \frac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}} \quad (5)$$

$$I_{A2} = -I_{A1} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (6)$$

$$I_{A0} = -I_{A1} \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (7)$$

M侧各序电流突变量分别为:

$$I_{A1M} = C_{1M} I_{A1} \quad (8)$$

$$I_{A2M} = C_{2M} I_{A2} \quad (9)$$

$$I_{A0M} = C_{0M} I_{A0} \quad (10)$$

当 $C_{0M} = C_{1M}$ 时, $I_{AM} = 0$

$$\text{所以其电流比值 } K_A = \left| \frac{I_{AM}}{3 I_{0M}} \right| = 0$$

对于故障相B、C相分析:

当 $C_{0M} = C_{1M}$ 时:

$$I_{BM} = a^2 I_{A1M} + a I_{A2M} + I_{B0M} \quad (11)$$

$$I_{CM} = a I_{A1M} + a^2 I_{A2M} + I_{C0M} \quad (12)$$

$$K_B = \left| \frac{I_{BM}}{3 I_{0M}} \right| = \left| \frac{(a^2 - a) Z_{0\Sigma} + (a^2 - 1) Z_{2\Sigma}}{3 Z_{2\Sigma}} \right| \quad (13)$$

$$K_C = \left| \frac{I_{CM}}{3 I_{0M}} \right| = \left| \frac{(a - 1) Z_{2\Sigma} + (a - a^2) Z_{0\Sigma}}{3 Z_{2\Sigma}} \right| \quad (14)$$

$$\text{经化简整理, 可得 } K_B = K_C = \sqrt{1 + K_{0\Sigma} + K_{0\Sigma}^2} / \sqrt{3} \quad (15)$$

式中 $K_{0\Sigma} = Z_{0\Sigma} / Z_{2\Sigma}$

当 $K_{0\Sigma} = 0$ 时, $K_B = K_C = 1 / \sqrt{3}$

当 $K_{0\Sigma} = 3$ 时, $K_B = K_C = \sqrt{13} / \sqrt{3}$

可见故障相电流比随 $K_{0\Sigma}$ 变化, 当 $K_{0\Sigma}$ 从0~3变化时, 其比值从0.577~2.08变化。

(三) 当经过渡电阻接地短路时

1. 设A相经过渡电阻 R_g 接地, 则:

$$I_A = 3 I_{A0} = \frac{3 E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3 R_g} \quad (16)$$

当 $C_{0M} = C_{1M} = C_{2M}$ 时:

故障相电流比值仍为: $K_A = 1$

非故障相的电流比值 $K_B = K_C = 0$

2. 两相经过渡电阻接地时。设BC两相经 R_g 接地。当 $C_{0M} = C_{1M}$ 时, 非故障相电

流比 $K_A = 0$

对两故障相B相、C相, 当 $C_{0M} = C_{1M}$ 时:

$$K_B = \left| \frac{I_{BM}}{3 I_{0M}} \right| = \left| \frac{[(a^2 - 1) + (a^2 - a)K_{0\Sigma} + (a^2 - a)K_R]}{3} \right| \quad (17)$$

$$K_C = \left| \frac{I_{CM}}{3 I_{0M}} \right| = \left| \frac{[(a - 1) + (a - a^2)K_{0\Sigma} + (a - a^2)K_R]}{3} \right| \quad (18)$$

经化简整理可得:

$$K_B = K_C = \sqrt{1 + K_{0\Sigma} + K_{0\Sigma}^2 + \sqrt{3}K_R + K_R^2} / \sqrt{3} \quad (19)$$

$$\text{式中: } K_{0\Sigma} = \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}} \quad K_R = \frac{3R_g}{X_{2\Sigma}}$$

3. 两相经相间过渡电阻又经接地过渡电阻短路时
设相间的过渡电阻为 r_d , 对地过渡电阻为 R_g 。其复
合序网如图 2 (b) 所示。

当 $C_{0M} = C_{1M}$ 时, 保护安装处非故障的A相电流突
变量与零序电流突变量之比为零。

而故障相 (B、C相) 电流突变量与零序电流突变量
之比为:

$$\left. \begin{aligned} K_B &= \frac{(a^2 - a)Z_{0\Sigma} + (a^2 - 1)Z_{2\Sigma} + (a^2 - a)3R_g + 3a^2r_d}{3(Z_{2\Sigma} + r_d)} \\ K_C &= \frac{(a - a^2)Z_{0\Sigma} + (a - 1)Z_{2\Sigma} + (a - a^2)3R_g + 3ar_d}{3(Z_{2\Sigma} + r_d)} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

当 $Z_{0\Sigma} = 0$, 且假定 $r_d \ll Z_{2\Sigma}$, 则其比值为:

$$K_B = K_C = \frac{\sqrt{1 + \sqrt{3}K_R + K_R^2} + \frac{1}{3}K_R^2 + K_RK_r + \frac{1}{\sqrt{3}}K_r}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$$\text{式中, } K_R = \frac{3R_g}{X_{2\Sigma}} \quad K_r = \frac{3r_d}{X_{2\Sigma}}$$

当 $r_d \gg Z_{2\Sigma}$ 时, 其比值为:

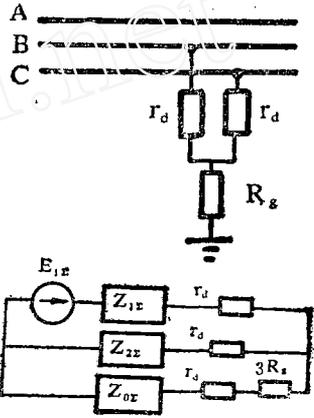
$$K_B = K_C = \frac{\sqrt{3 + 3K_R' + K_R'^2}}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

$$\text{式中: } K_R' = \frac{3R_g}{r_d}$$

当 $Z_{0\Sigma} \neq 0$ 时, 其比值还要增大。与无过渡电阻相比, 其故障相电流比值呈增大趋势。

可见, 当单相经过渡电阻接地短路时, 故障相电流之比值与无过渡电阻时一样, 即
不受过渡电阻的影响。

当两相经过渡电阻接地或两相经相间过渡电阻又经接地电阻故障时, 故障相电流比
值将随 $K_{0\Sigma}$ 、 K_R 、 K_r 而变化, 在靠近变压器中性点接地时, $K_{0\Sigma}$ 最小, 比值最低。但



与无过渡电阻情况相比，故障相选相元件灵敏度提高了。因此，本选相元件具有不受过渡电阻影响的特点。

根据以上分析，故障相电流比值最小值为 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，而非故障相电流比值为0。因此，电流比选相元件的判据为：

$$\left. \begin{array}{l} \text{A相故障: } K_A > K_K \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \text{B相故障: } K_B > K_K \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \text{C相故障: } K_C > K_K \frac{1}{\sqrt{3}} \end{array} \right\} \quad (23)$$

式中， K_K 为可靠系数，如取为0.9，则判别式为：

$$K_A (K_B, K_C) > 0.5 \quad (24)$$

三 电流比选相元件灵敏度分析

由以上分析可以看出，当门坎值 K_K 一定时，故障相电流比值越大，选相元件越灵敏。而非故障相电流比值越小，则非故障相元件越不易误动。

在上面的分析中，曾假设 $C_{0M} = C_{1M}$ ，且认为 $K_{0\Sigma}$ 为一实数，即零序阻抗角与正序阻抗角相等。实际上，在线路上各点发生接地短路时，一般地 $C_{0M} \neq C_{1M}$ 且 $K_{0\Sigma}$ 不为实数，以下仅就 $C_{0M} \neq C_{1M}$ 时分析选相元件的灵敏度。

以A相单相接地故障为例，对故障分支，恒有： $I_A = 3 I_0, I_B = I_C = 0$ ，如图3所示。

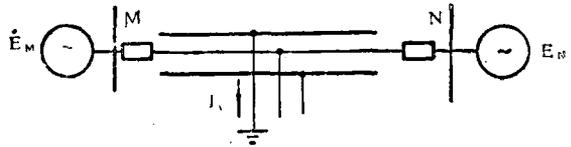


图3

而M侧A相电流为：

$$\begin{aligned} I_{AM} &= C_{1M} I_{A1} + C_{2M} I_{A2} + C_{0M} I_{A0} \\ &= 2 C_{1M} I_{A0} + C_{0M} I_{A0} \\ &= (2 C_{1M} + C_{0M}) I_{A0} \end{aligned}$$

$$3 I_{0M} = 3 C_{0M} I_{A0}$$

$$\text{其比值 } K_A = \frac{2 C_{1M} + C_{0M}}{3 C_{0M}} = \frac{2 C_{1M}}{3 C_{0M}} + \frac{1}{3} \quad (25)$$

当 $C_{0M} > C_{1M}$ 时， $K_A < 1$ 。因而故障相元件灵敏度下降。

对非故障相B、C相分析，例如：

$$I_{BM} = a^2 C_{1M} I_{A1} + a C_{2M} I_{A2} + C_{0M} I_{A0} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} &= (a^2 + a) C_{1M} I_{A0} + C_{0M} I_{A0} \\ &= (C_{0M} - C_{1M}) I_{A0} \end{aligned} \quad (27)$$

$$3 I_{0M} = 3 C_{0M} I_{A0} \quad (28)$$

当 $C_{0M} \approx C_{1M}$ 时, 其比值 $K_B = \frac{C_{0M} - C_{1M}}{3C_{0M}} \approx 0$

所以选相元件的动作门坎值不能太低, 否则容易造成非故障相选相元件误动。但门坎值也不亦太高, 否则, 在靠近变压器中性点接地时 ($K_{0r} \approx 0$) 故障相选相元件灵敏度太低。

为此可采用浮动门坎值方法, 例如取门坎值:

$$K_0 = (K_A + K_B + K_C) / 3 \quad (29)$$

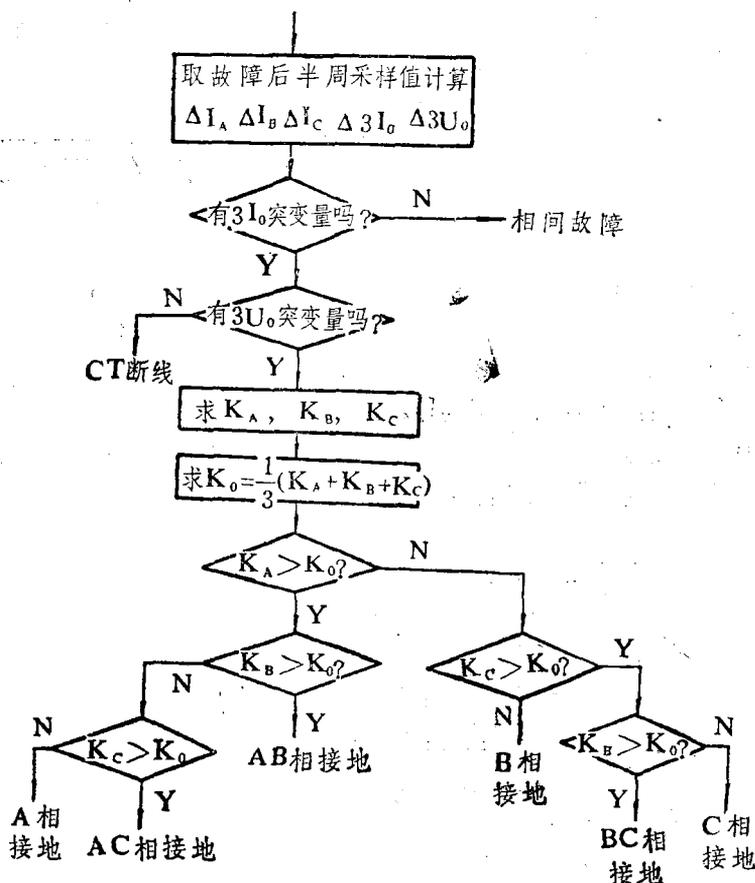
选相元件的判别式为: $K_A (K_B, K_C) > K_0$ (30)

在单相接地故障时, (例如A相) 当 $C_{0M} \approx C_{1M}$ 时,

$K_A + K_B + K_C = 1$ 则 $K_0 = \frac{1}{3}$ 。当 $C_{0M} = 3C_{1M}$ 时, 故障相比值 $K_A = \frac{5}{9}$, 则其灵敏系数为 $\frac{5/9}{1/3} = 1.67$ 而非故障相比值 K_B, K_C 均为 $\frac{2}{9} < \frac{1}{3}$ 不会误判。

四 选相元件的逻辑框图

根据以上分析, 在数字保护中, 采用电流比选相元件构成的逻辑框图如图 4 所示。



五 仿真试验

根据以上原理,用高级语言编制了选相元件程序。并利用了EMPT电势暂态仿真程序进行了数字仿真。仿真系统为一条长300kM的220kV线路,分别在25kM,150kM,300kM处模拟了单相及两相接地短路,结果证明,该电流比选相元件能够正确判断出故障相。且在末端接地时,非故障相的电流比与故障相电流比差别较小,这与理论分析是吻合的。

利用这一原理编制的程序应用在单片机零序电流保护中作为接地故障的选相元件,经实验室模拟实验,证明是可行的。

六 结 论

1. 反应相电流突变量与零序电流突变量之比值的选相元件能够在接地故障时正确判断出故障相别。

2. 电流比选相元件具有原理简单、判据明确,不受过渡电阻影响的特点。

3. 与反应序分量或比相式选相元件相比,无需滤序,判相位,因而编程简单,动作速度快。

4. 与以往提出的电压比 $\left(\frac{U_{BC}}{U_A}, \frac{U_{CA}}{U_B}, \frac{U_{AB}}{U_C}\right)$ 选相元件相比,具有较高的灵敏度。尤其是在末端接地时,电压比选相元件非故障相与故障相之比极为接近,容易误判。这一点已被仿真试验所证实。

参考文献

1. 电力系统故障分析 华北电力学院编
2. 500kV高压输电线路单相重合闸选相元件新方案——电压比值继电器探讨 电力系统自动化 1978. 4
3. 工频突变量相位比较式选相元件的研究 电力系统自动化 1988. 5
4. 微型机继电保护基础 华北电力学院 杨奇逊主编