

变压器差动保护单相接地灵敏度分析

李忠安

(电力自动化研究院,江苏 南京 210003)

摘要: 变压器差动保护电流相位调整通常采用 Y 变换,在单相故障时灵敏度低于相间短路与三相短路灵敏度。分析了各种电流相位调整方法在单相接地时的灵敏度,证明 Y 变换在单相接地时灵敏度最高。

关键词: 相位调整; 单相接地; 差动保护

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)01-0039-03

1 引言

由于 Y 接线变压器三角形侧与星型侧 CT 二次电流相位相差 30°,差动保护计算差流前需进行电流相位调整,现在通常采用软件调整方法,采用 Y 变换或 Y 变换。但无论是 Y 变换还是 Y 变换,在单相接地时差动保护灵敏度都低于相间故障或三相故障时灵敏度。而 110 kV 级以上系统中单相接地故障占 70% 以上,变压器单相接地故障几率也很高,约占 47% 左右^[1]。因此分析差动保护在单相接地故障时的灵敏度,对变压器安全运行大有益处。

2 变压器外部故障分析

这里以 Y-11 接线变压器为例,分析各种短路情况下变压器各侧故障电流。计算用系统图如图 1,等效电路如图 2。

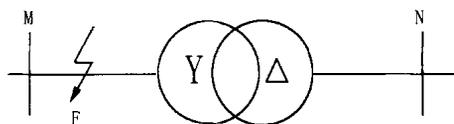


图 1 系统图

Fig. 1 System for calculation

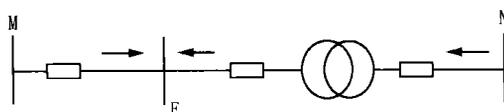


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

(1) 星型侧 (M 侧) 单相接地,不妨设为 A 相接地,有

$$I_{F1} = I_{F2} = I_{F0} = E / (2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0})$$

由于 $I_{N1} = e^{j30^\circ} C_N I_{F1}$, $I_{N2} = e^{-j30^\circ} C_N I_{F2}$, 则角型侧 (N 侧) 各相电流

$$I_{NA} = I_{N1} + I_{N2} = \sqrt{3} C_N I_{F1} = \sqrt{3} C_N E / (2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0})$$

$$I_{NB} = I_{F1} - I_{F2} = 0$$

$$I_{NC} = I_{F1} - I_{F2} = -\sqrt{3} I_{F1} = \frac{-\sqrt{3} C_N E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$$

$$\text{此时 } M \text{ 侧故障电流为 } I_{MA} = \frac{(2 C_M + C_{M0}) E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}},$$

$$I_{MB} = I_{MC} = (C_{M0} - C_M) E / (2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0})$$

其他各种故障情况下 M、N 两侧故障电流如表 1。

表 1 M、N 两侧故障电流

Tab. 1 Fault current on M and N side

	I_{MA}	I_{MB}	I_{MC}	I_{NA}	I_{NB}	I_{NC}
单相接地 (AG)	$\frac{(2 C_M + C_{M0}) E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$	$\frac{(C_{M0} - C_M) E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$	$\frac{(C_{M0} - C_M) E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$	$\frac{\sqrt{3} C_N E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$	0	$\frac{-\sqrt{3} C_N E}{2 Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$
相间短路 (BC)	0	$-j \frac{\sqrt{3} C_M E}{2 Z_{\Sigma 1}}$	$j \frac{\sqrt{3} C_M E}{2 Z_{\Sigma 1}}$	$j \frac{C_N E}{2 Z_{\Sigma 1}}$	$-2j \frac{C_N E}{2 Z_{\Sigma 1}}$	$j \frac{C_N E}{2 Z_{\Sigma 1}}$
三相短路 (ABC)	$\frac{C_M E}{Z_{\Sigma 1}}$	$\frac{-C_M E}{Z_{\Sigma 1}}$	$\frac{-C_M E}{Z_{\Sigma 1}}$	$\frac{e^{j30^\circ} C_N E}{Z_{\Sigma 1}}$	$\frac{-j C_N E}{Z_{\Sigma 1}}$	$\frac{e^{j150^\circ} C_N E}{Z_{\Sigma 1}}$

3 电流相位调整

设变压器星型侧电流变换矩阵 $\begin{bmatrix} a & b & c \\ c & a & b \\ b & c & a \end{bmatrix}$, 角

型侧电流变换矩阵 $\begin{bmatrix} A & B & C \\ C & A & B \\ B & C & A \end{bmatrix}$ 。假设两侧额定电

流相同, 正常负荷情况下根据相电流平衡无差流有:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ c & a & b \\ b & c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A & B & C \\ C & A & B \\ B & C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} \\ e^{j270^\circ} \\ e^{j150^\circ} \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

另外区外故障时差动继电器应满足三相电流平衡无差流, 则当星型侧无电源(或断开), 变压器星型侧区外单相接地时, 差动保护三相差流可表示为:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ c & a & b \\ b & c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3I_{FI}^{(1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A & B & C \\ C & A & B \\ B & C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{3}I_{FI}^{(1)} \\ 0 \\ -\sqrt{3}I_{FI}^{(1)} \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

由式(1)、(2)可得

$$\begin{cases} \sqrt{3}a = A - C \\ \sqrt{3}c = C - B \\ \sqrt{3}b = B - A \end{cases} \quad (3)$$

容易验证: 当 a、b、c、A、B、C 满足式(3)时, 变压器其他区外故障(星型侧相间短路、两相接地、三相短路及角型侧相间短路、三相短路)差动保护均三相电流平衡无差流。

4 单相接地灵敏度分析

4.1 星型侧灵敏度

根据以上计算, 星型侧单相接地时星型侧短路电流调整后差流为:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ c & a & b \\ b & c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{MA} \\ I_{MB} \\ I_{MC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3a \\ 3b \\ 3c \end{bmatrix} \frac{C_M E}{2Z_1 + Z_0}$$

星型侧相间短路时星型侧短路电流调整后差流为:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ c & a & b \\ b & c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{MA} \\ I_{MB} \\ I_{MC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c - b \\ b - a \\ a - c \end{bmatrix} \left(-j \frac{\sqrt{3} C_M E}{2 Z_1} \right)$$

星型侧三相短路时星型侧短路电流调整后差流为:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ c & a & b \\ b & c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{MA} \\ I_{MB} \\ I_{MC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a + b^2 + c \\ c + a^2 + b \\ b + c^2 + a \end{bmatrix} \frac{C_M E}{Z_1}$$

为了保证单相接地时灵敏度与相间短路灵敏度

相比具有最大值, 只需使单相接地调整后最大差流与相间短路调整后差流比值最接近于 1。设 $k = (Z_0 - Z_1)/3Z_1$, $a = \max(|a|, |b|, |c|)$, 且 $a > 0$, 有

$$\max(I_{CDA}, I_{CDB}, I_{CDC}) = \frac{3aC_M E}{(3+3k)Z_1} = \frac{a}{1+k} \frac{C_M E}{Z_1}$$

由于 $a + b + c = 0$, 设 $b = -la$, $c = -(1-l)a$, 此处

$$0 < l < 1, \text{ 有 } I_{CDA} = \frac{\sqrt{3}}{2} |2l-1| a \frac{C_M E}{Z_1}, I_{CDB} = \frac{\sqrt{3}}{2} (1+l)$$

$$\cdot a \frac{C_M E}{Z_1}, I_{CDC} = \frac{\sqrt{3}}{2} (2-l) a \frac{C_M E}{Z_1}.$$

当 $l = 0.5$ 时, 有

$$\max(I_{CDA}, I_{CDB}, I_{CDC}) = \frac{\sqrt{3}}{2} (1+l) a \frac{C_M E}{Z_1}$$

灵敏度比值为:

$$\begin{aligned} & \frac{a}{1+k} \frac{C_M E}{Z_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} < 1 \\ & = \frac{\sqrt{3}}{2} (1+l) a \frac{C_M E}{Z_1} \end{aligned}$$

$$\max = \frac{4}{3\sqrt{3}(1+k)}, \text{ 此时 } l=0.5, \text{ 即 } b=c=-\frac{1}{2}a$$

当 $l = 0.5$ 时, 有

$$\max(I_{CDA}, I_{CDB}, I_{CDC}) = \frac{\sqrt{3}}{2} (2-l) a \frac{C_M E}{Z_1}$$

灵敏度比值为

$$\begin{aligned} & \frac{a}{1+k} \frac{C_M E}{Z_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} < 1 \\ & = \frac{\sqrt{3}}{2} (2-l) a \frac{C_M E}{Z_1} \end{aligned}$$

$$\max = \frac{4}{3\sqrt{3}(1+k)}, \text{ 此时 } l=0.5, \text{ 即 } b=c=-\frac{1}{2}a$$

为了保证单相接地时灵敏度与三相短路灵敏度相比时具有最大值, 只需使单相接地调整后最大差流与三相短路调整后差流比值最接近于 1。由于三相短路后各相电流大小相同, 即

$$\max(I_{CDA}, I_{CDB}, I_{CDC}) = |a + b^2 + c| \frac{C_M E}{Z_1} = |b^2 + c - b - c| \frac{C_M E}{Z_1} = \sqrt{3(b^2 + bc + c^2)} \frac{C_M E}{Z_1}$$

灵敏度比值为:

$$\begin{aligned} & \frac{a}{1+k} \frac{C_M E}{Z_1} = \frac{a}{(1+k)\sqrt{3(b^2 + bc + c^2)}} < 1 \\ & = \frac{a}{\sqrt{3(b^2 + bc + c^2)}} \frac{C_M E}{Z_1} \end{aligned}$$

$$\max = \frac{2}{3(1+k)}, \text{ 此时 } b=c=-\frac{1}{2}a$$

4.2 角型侧灵敏度

星型侧单相接地角型侧短路电流调整后差流为:

$$\begin{bmatrix} A & B & C \\ C & A & B \\ B & C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \frac{C_N E}{2 Z_1 + Z_0} \\ 0 \\ -\sqrt{3} \frac{C_N E}{2 Z_1 + Z_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}(A - C) \\ \sqrt{3}(C - B) \\ \sqrt{3}(B - A) \end{bmatrix} \cdot \frac{C_N E}{2 Z_1 + Z_0} = \begin{bmatrix} 3a \\ 3c \\ 3b \end{bmatrix} \frac{C_N E}{2 Z_1 + Z_0}$$

星型侧相间短路时角型侧短路电流调整后差流为:

$$\begin{bmatrix} A & B & C \\ C & A & B \\ B & C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \frac{C_N E}{2 Z_1} \\ -2j \frac{C_N E}{2 Z_1} \\ j \frac{C_N E}{2 Z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - 2B + C \\ C - 2A + B \\ B - 2C + A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j \frac{C_N E}{2 Z_1} \\ -2j \frac{C_N E}{2 Z_1} \\ j \frac{C_N E}{2 Z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}(c - b) \\ \sqrt{3}(b - a) \\ \sqrt{3}(c - c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \frac{C_N E}{2 Z_1} \\ -2j \frac{C_N E}{2 Z_1} \\ j \frac{C_N E}{2 Z_1} \end{bmatrix}$$

星型侧三相短路时角型侧短路电流调整后差流为:

$$\begin{bmatrix} A & B & C \\ C & A & B \\ B & C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} \frac{C_N E}{Z_1} \\ e^{j270^\circ} \frac{C_N E}{Z_1} \\ e^{j150^\circ} \frac{C_N E}{Z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B^2 + C \\ C + A^2 + B \\ B + C^2 + A \end{bmatrix} \frac{e^{j30^\circ} C_N E}{Z_1} = \begin{bmatrix} -b + c \\ -a + b \\ -c + a \end{bmatrix} \frac{\sqrt{3} e^{j30^\circ} C_N E}{Z_1}$$

同样可以证明当 $b = c = -0.5a$ 时, 单相接地时灵敏度与相间短路时灵敏度比值具有最大值 $\frac{4}{3\sqrt{3}(1+k)}$, 此处 $k = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$ 。

为了保证单相接地时灵敏度与三相短路灵敏度比值具有最大值, 只需使单相接地调整后最大差流与三相短路调整后差流比值最接近于 1。由于三相短路后各相电流大小相同, 即

$$\max(I_{DA}, I_{DB}, I_{DC}) = |-b + c| \frac{\sqrt{3} C_N E}{Z_1} = \sqrt{b^2 + c^2 + bc} \sqrt{3} C_N E / Z_1$$

设 $k = (Z_0 - Z_1) / 3Z_1$, $a = \max(|a|, |b|, |c|)$ 且 $a > 0$, 灵敏度比值为

$$\frac{a C_N E}{1 + k Z_1} = \frac{a C_N E}{\sqrt{b^2 + bc + c^2} \sqrt{3} C_N E / Z_1} =$$

$$\frac{\sqrt{\frac{a^2}{b^2 + bc + c^2}} \frac{1}{\sqrt{3}(1+k)}} < 1$$

$$\max = \frac{2}{3(1+k)}, \text{ 此时 } b = c = -0.5a。$$

5 结论

(1) 当 $b = c = -0.5a$ 时, 采用此种电流相位调整方法的差动保护单相接地灵敏度相对于相间短路灵敏度与三相短路灵敏度最大。我们可以发现当 a 取 $2/3$ 时, 变换矩阵刚好为 RCS-978 变压器保护中差动保护采取的变换方法。也就是说 RCS-978 变压器保护采用的 Y 变换在单相接地时灵敏度最高。

(2) 无论哪种电流相位调整方法在单相接地时灵敏度不超过相间短路的 $4/3\sqrt{3}(1+k)$, 不会超过三相短路时灵敏度的 $2/3(1+k)$, 且随着 k 值(系统零序补偿系数)增大, 灵敏度进一步降低。

参考文献:

- [1] 周玉兰. 1990 年 ~ 1999 年 220kV 以上变压器保护运行情况[J]. 电力自动化设备, 2001, (5).
- [2] 陈曾田. 电力变压器保护(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.

收稿日期: 2002-04-01

作者简介:

李忠安(1975 -), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护和综合自动化。

Sensitivity analysis of the transformer differential protection while single phase grounding

LI Zhong-an

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Y transformation is conventionally used by CT secondary current phase adjusting of transformer differential protection while its sensitivity of single-phase to earth fault is lower than that of three phase fault and interphase fault. The paper gives a analysis to all kinds of adjusting methods of CT secondary current phase and shows that the sensitivity of Y transformation is the highest.

Key words: phase adjusting; single-phase grounded; differential protection