

变压器分接头改变对区内单相高阻接地故障灵敏度的影响

陈志峰,徐习东,徐亮

(浙江大学电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 评价变压器纵差保护性能优劣的指标之一是其反应高阻接地故障及匝间故障的灵敏度。目前广泛采用的带比率制动的差动保护,在不同工况下,其反应高阻接地故障与匝间故障的灵敏度是不同的。该文分析了变压器分接头调整引起的不平衡电流与区内高阻接地故障形成的差动电流之间的向量关系。指出了分接头升高与降低造成的不平衡电流对保护的灵敏度有不同的影响。最后通过数字仿真对此进行了验证。

关键词: 灵敏度; 比率差动保护; 分接头改变; 不平衡电流; 接地故障

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)13-0001-04

0 引言

目前,变压器纵差保护广泛采用比率制动元件。在动模实验中,发现相同定值的比率制动元件,在满负荷情况下调整变压器分接头时,其反应高阻接地故障及匝间故障的灵敏度不同。调整分接头引起的差动不平衡电流有时能有利于提高差动保护的灵敏度,有时会降低差动保护的灵敏度。因此,本文对分接头改变引起的不平衡电流与高阻接地引起的差动电流进行了分析比较,为今后动模试验提供了参考。

1 变压器分接头调整引起的差动不平衡电流

变压器纵差保护中,差动不平衡电流主要由以下因素产生:(1)电流互感器(CT)误差,(2)变压器分接头调整,(3)计算变比与实际变比不一致,(4)励磁涌流,(5)CT断线。

比率制动元件主要对(1)、(2)、(3)三种因素产生的不平衡电流进行制动。由于微机保护采用软件进行调整平衡,因此,因素(3)产生的不平衡电流可忽略。文献[1]中,提出了引入分接头位置接点来消除分接头调整引起的不平衡电流的影响,然而引入分接头位置接点将增加保护的复杂性,不利于提高保护的可靠性,因此目前纵差保护均未引入分接头位置接点。为突出分接头改变引起的不平衡电流,下文中均未计及CT误差的影响。

对图1所示的系统,设故障前变压器Y侧三相电压为 $U_{D(0)A}$, $U_{D(0)B}$, $U_{D(0)C}$ 。系统与线路串联阻抗为 Z_s ,变压器正序、负序与零序短路电抗分别为 X_{T1} , X_{T2} (近似认为 $X_{T1}=X_{T2}$)和 X_{T0} ,负载阻抗为 Z_L ,

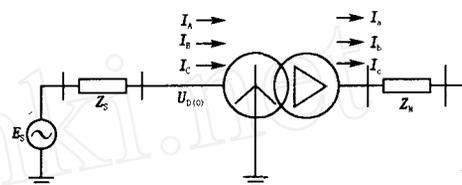


图1 电力系统模型

Fig 1 Power system model

变压器变比为 n_B , I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_a 、 I_b 、 I_c 分别是两侧三相电流,参考方向如图1所示,两侧CT变比为 n_1 , n_2 。变压器差动保护在 Y_0 侧的CT二次侧采用 Y/Δ 换方式, k_1 、 k_2 分别为微机保护中两侧的调平衡系数。下面以A相差动电流为例,计算差动电流:

$$I_{dA} = \frac{I_A - I_b}{n_1 k_1} - \frac{I_a}{n_2 k_2} \quad (1)$$

正常运行时,忽略变压器励磁电流,有 $I_a = \frac{n_B}{\sqrt{3}} \cdot$

$(I_A - I_b)$ 。通过整定 k_1 、 k_2 ,可以使得 $n_B = \frac{\sqrt{3}n_2 k_2}{n_1 k_1}$,从而:

$$I_{dA} = 0 \quad (2)$$

当变压器分接头改变时,通常不调整差动保护的平衡系数,即 $n_1 k_1$ 、 $n_2 k_2$ 均保持不变,而 n_B 发生了改变。设高压侧分接头调整幅度为 $U(\%)$ 。此时,变压器变比为 n_B 。 $n_B = n_B (1 + U)$ 。差动回路将因此产生差动不平衡电流。A相不平衡电流为:

$$I_{dpA} = -U \frac{I_{dA}}{n_1 k_1} \quad (3)$$

其中: $I_{AB} = I_A - I_B$; $I_A = \frac{U_{D(0)A}}{X_{T1} + Z_N}$; $I_B = \frac{U_{D(0)B}}{X_{T1} + Z_N}$ 。

设负荷功率因数角为 ϕ , 则三相电势, 三相电流及 A 相差动电流的相位关系如图 2 所示, 不平衡电流相位如图 3 所示。

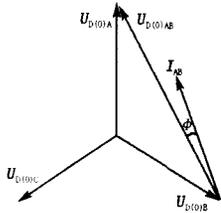


图 2 三相电势, 电流相位矢量图

Fig 2 Vector of three phase voltage and current

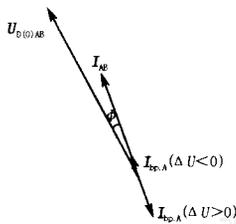


图 3 不平衡电流矢量图

Fig 3 Vector of unbalanced current

从图 3 可得: 当分接头向上调整时, 不平衡电流 $I_{bp,A}$ 与负荷电流 I_{AB} 方向相反; 当分接头向下调整时, 不平衡电流 $I_{bp,A}$ 与负荷电流 I_{AB} 方向相同。

2 单相高阻接地故障产生的差动电流

对如图 1 所示系统, 发生 Y_0 侧区内单相高阻接地故障时, 将变压器二次侧参数折算到一次侧后, 可得正序、负序、零序网络等值电路。根据叠加原理, 正序网络等值电路可分解为正常运行正序网络和故障分量正序网络, 等值电路图如图 4、图 5 所示; 故障分量负序、零序网络等值电路图如图 6、图 7 所示。

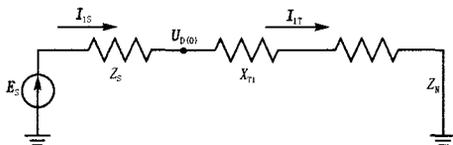


图 4 正常正序网络

Fig 4 Normal positive sequence network

设故障相为 A 相, 接地点正序、负序、零序故障分量为^[2,3]:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D0} = \frac{U_{D(0)A}}{\sum X + 3R_g} \quad (4)$$

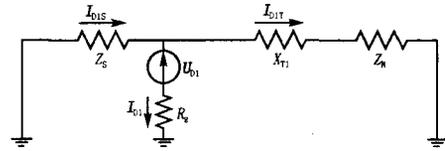


图 5 故障正序网络

Fig 5 Fault positive sequence network

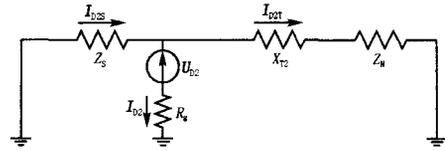


图 6 故障负序网络

Fig 6 Fault negative sequence network

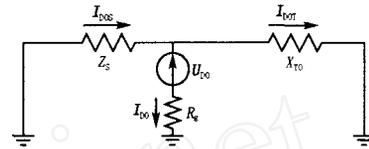


图 7 故障零序网络

Fig 7 Fault zero sequence network

其中: $\sum X = \sum X_1 + \sum X_2 + \sum X_0$

$$\sum X_1 = \sum X_2 = \frac{Z_s (X_{T1} + Z_N)}{Z_s + X_{T1} + Z_N}; \quad \sum X_0 = \frac{Z_s X_{T0}}{Z_s + X_{T0}}$$

R_g 为接地点过渡电阻。

流过系统与变压器的正、负、零序故障分量电流

为: $I_{D1S} = I_{D2S} = I_{D1} \frac{X_{T1} + Z_N}{Z_s + X_{T1} + Z_N}$;

$$I_{D1T} = I_{D2T} = - I_{D1} \frac{Z_s}{Z_s + X_{T1} + Z_N}$$

$$I_{D0S} = I_{D0} = \frac{X_{T1}}{Z_s + X_{T1}}; \quad I_{D0T} = - I_{D0} \frac{Z_s}{Z_s + X_{T1}}$$

由于系统阻抗远小于负载阻抗, 所以:

$$|I_{D1T}| \ll |I_{D1S}| \quad (5)$$

根据叠加原理, 故障时, 差动电流由负荷电流产生的不平衡电流与故障分量差动电流组成。A 相差动电流为:

$$I_{JA} = I_{bp,A} + I_{JA} \quad (6)$$

其中: I_{JA} 为故障电流分量造成的差动电流, 其值为:

$$I_{JA} = \frac{I_A - I_B}{n_1 k_1} - \frac{I_A}{n_2 k_2} =$$

$$\frac{(I_{D1S} + I_{D2S} + I_{D0S}) - (a^2 I_{D1S} + a I_{D2S} + I_{D0S})}{n_1 k_1} -$$

$$\frac{[(I_{D1T} + I_{D2T} + I_{D0T}) - (a^2 I_{D1T} + a I_{D2T} + I_{D0T})] \frac{n_B}{\sqrt{3}}}{n_2 k_2} \quad (7)$$

其中: I_A 、 I_B 为高压侧 A 相、B 相故障电流分量;

I_a 为低压侧 a相故障电流分量。

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, a^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

若 $U = 0$, 据式 (7), 可得:

$$I_{JA} = \frac{(I_{b1S} - I_{b1T}) + (I_{b2S} - I_{b2T}) - a^2(I_{b1S} - I_{b1T}) - a(I_{b2S} - I_{b2T})}{n_1 k_1} = \frac{I_{b1} + I_{b2} - (a^2 I_{b1} + a I_{b2})}{n_1 k_1} = \frac{I_{b1} + I_{b2} + I_{b1}}{n_1 k_1} = \frac{3I_{b1}}{n_1 k_1} \quad (8)$$

$U = 0$ 时, $I_{bp, A} = 0$, 所以:

$$I_{JA} = I_{JA} = \frac{3I_{b1}}{n_1 k_1} \quad (9)$$

即差动电流为故障相接地电流。其向量如图 8 所示。

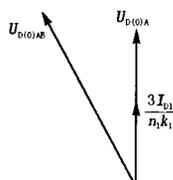


图 8 故障差动电流

Fig 8 Fault differential current

若 $U \neq 0$, 则 I_{b1T} 、 I_{b2T} 、 I_{b0T} 将按 $n_b(1 + U)$ 归算。将 $n_b(1 + U)$ 代入式 (7), 则 I_{JA} 在式 (8) 的基础上, 增加一个补偿分量 I_{JA} , 其值为:

$$I_{JA} = -U \frac{\sqrt{3} I_{b1T} e^{-j30^\circ}}{n_1 k_1}$$

通常情况下, $U < 20\%$, 所以 $|U \sqrt{3} e^{-j30^\circ}| < 1$, 再根据式 (5), 可得:

$$\left| -U \frac{\sqrt{3} I_{b1T} e^{-j30^\circ}}{n_1 k_1} \right| \ll \left| \frac{3I_{b1}}{n_1 k_1} \right|, \text{ 所以 } I_{JA} \text{ 很小, 可忽略不计。}$$

此时:

$$I_{JA} = I_{bp, A} + I_{JA} + I_{JA} = I_{bp, A} + I_{JA} = \frac{3I_{b1}}{n_1 k_1} - U \frac{I_{b1}}{n_1 k_1} \quad (10)$$

差动电流向量图如图 9 所示。

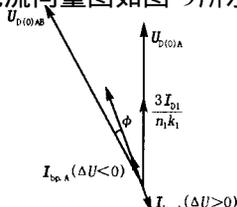


图 9 故障差动电流与不平衡电流

Fig 9 Fault differential current and unbalanced current

其中:故障差动电流与 $U_{D(0)A}$ 同方向, 不平衡电流与 $U_{D(0)A}$ 方向夹角为 $30^\circ - \phi$ 。通常 ϕ 为一锐角, 所以 $U < 0$ 时, 不平衡电流对故障差动电流起助增作用; $U > 0$ 时不平衡电流对故障差动电流起抵消作用。

比较式 (9)、式 (10)可知, 变压器分接头的调整对故障引起的差动电流几乎没有影响。但是变压器容量与最大负荷电流 I_{AB} 绝对值成正比。系统容量越大, 变压器分接头调整导致的不平衡电流越大, 即对接地故障差动电流的影响越大。

此外, 对于变压器负荷侧的区外故障, 负荷电流与故障电流均为穿越电流, 可以将它们的矢量叠加, 形成总穿越电流, 当变压器分接头向上 ($U > 0$) 或向下 ($U < 0$) 调节时, 差动电流方向与总穿越电流相反或相同, 但差动电流大小只与分接头调整大小及总穿越电流大小有关。由于比率差动保护中, 只计及差动电流的大小, 不受其方向影响, 因此, 差动保护可靠性只受 U 绝对值大小的影响, 与 U 的正负无关, 即向上、向下调节分接头对差动保护可靠性的影响一致。

3 数字仿真试验

为更直观地看到分接头调节对高阻接地故障的影响, 我们采用如下参数进行仿真计算。变压器额定容量: 150 MVA, 变压器接线方式: $Y_0 / -11$ 。高压侧额定电压 220 kV / 35 kV, 空载损耗 105 kW, 空载电流 0.3%, 短路阻抗 12%, 负荷功率因数 $\cos \theta = 0.9$; 分接头在高压侧, 按照 12.5% 上下调整, 接地电阻 300 Ω 。仿真波形如图 10 所示。

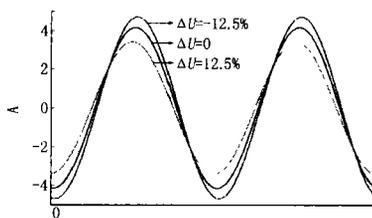


图 10 差动电流仿真波形

Fig 10 Simulation wave of differential current

满负荷运行时, Y 侧额定相电流为 394 A, 额定相间电流为 682 A; 选择 $n_1 k_1 = 682 / 5 = 136.4$ 以 A 相发生接地故障为例, 通过数字仿真计算可得 A 相差动电流分别为: (1) $U = 12.5\%$ 时, 差动电流为 2.40 A; (2) $U = 0$ 时, 差动电流为 2.92 A; (3) $U = -12.5\%$ 时, 差动电流为 3.26 A。显然, 若差动保护的差动门槛取 0.5 倍额定电流, 即 2.5 A 时, 向

上调节变压器分接头,保护会拒动;向下调节变压器分接头,能提高保护灵敏度,灵敏度为 $3.26/2.5 = 1.30$ 。

4 结论

对降压变压器,当分接头位置向上调整时,在纵差保护中引起的不平衡电流增量方向与负荷电流方向相反。反之,当分接头位置向下调整时,纵差保护中的不平衡电流增量方向与负荷电流方向相同。

而单相高阻接地故障产生的差动电流与负荷电流方向接近,因此向上调节分接头对接地故障电流有助增作用,不利于纵差保护动作,降低了灵敏度;向下调节分接头,有利于纵差保护动作,提高了灵敏度。

单相高阻接地故障的接地电阻不变的情况下,变压器容量越大,变压器分接头调整产生的不平衡电流对纵差保护的灵敏度影响越大。

参考文献:

- [1] Ahmed A Y, AlMously S I Sensitivity Improvement of the Digital Differential Relay for Internal Ground Fault

Protection in the Power Transformer with Tap Changer [J]. IEEE Porto Power Tech Proceedings, 2001, (10): 532-538

- [2] 韩祯祥, 吴国炎. 电力系统分析 (第二版) [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1997. 373-381.
HAN Zhen-xiang, WU Guo-yan Electric Power System Analysis, Second Edition [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1997. 373-381.
- [3] 王维俭大型机组继电保护理论基础 (第二版) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1996. 22-28.
WANG Wei-jian The Theory Basic of Large Generator Protection, Second Edition [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1996. 22-28.

收稿日期: 2006-01-23; 修回日期: 2006-02-21

作者简介:

陈志峰 (1980 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究工作; Email: 87933096@sina.com

徐习东 (1966 -), 男, 副教授, 主要从事电力系统继电保护方面的研究工作;

徐亮 (1972 -), 工程师, 从事继电保护保护试验教学及研究工作。

Sensitivity shift of the transformer longitudinal differential protection due to adjusting the transformer on-load tap changer

CHEN Zhi-feng, XU Xi-dong, XU Liang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Transformer longitudinal differential protection can discriminate the internal resistance ground fault and the turn-to-turn fault, but the protective sensitivity is low. This paper analyses the vector of the unbalanced differential current caused by adjusting the transformer on-load tap changer (OLTC) and the vector of differential current caused by internal resistance ground fault. It points out that moving up or down the OLTC will increase the unbalanced differential current, but they have different influence on the sensitivity. Finally, an example is given to show the different influence.

Key words: sensitivity; percentage differential protection; adjusting transformer on-load tap changer; unbalanced current; ground fault

《继电器》精装合订本限量出售

为满足广大读者的需求,继电器杂志社连续推出了 2004、2005 年收藏版合订本,装帧精美、质地优良,总量 20 套,每套 300 元,欲购从速。

联系电话: 0374 - 3212444 联系人: 付永生

汇款地址: 河南省许昌市许继大道 32 号继电器杂志社 461000

开户行: 许昌市工行五一路支行

户名: 许昌继电器研究所

账号: 1708023029021010058 - 051