



采用积分模型可以求出线路阻抗参数:

$$\int_{t_0}^{t_1} u dt = R \int_{t_0}^{t_1} i dt + L \int_{t_0}^{t_1} \frac{di}{dt} dt$$

用梯形积分近似表示,可得:

$$u_1 + u_0 = R(i_1 + i_0) + 2L(i_1 - i_0)/T_s \quad (1)$$

式中 T_s 为采样间隔。

由式(1)知连续 3 点采样值便可求出线路的参数,由于数据窗短,响应快,再经过低通滤波滤除高频分量,以及采用适当的算法削弱非周期分量影响,可以比较准确地计算出线路参数。

假定系统是线性的,采用系统故障增量模型,故障电压、电流可以用故障前后的分量线性叠加表示。

$$u = u_0 + \Delta u, \quad i = i_0 + \Delta i$$

故式(1)可以表述如下:

$$\Delta u_1 + \Delta u_0 = R(\Delta i_1 + \Delta i_0) + 2L(\Delta i_1 - \Delta i_0)/T_s \quad (2)$$

在母线保护中,如果连接的支路比较多,TA 变比和型号不一致,特别是在低阻抗甚至中阻抗母线差动保护中,在大的短路电流作用下,TA 极易饱和;同样,在变压器保护的低压侧,通常采用带铁芯的 TA,在大的短路电流作用下,TA 也极易饱和。所以在配置差动保护的均需要考虑 TA 饱和的影响。

分析在图 1 中 K_1 点发生区外故障 TA_2 饱和情况下,测得的二次源阻抗值变化情况^[12]。

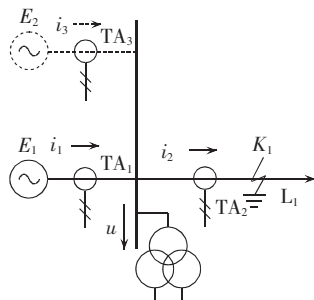


图 1 母线差动保护系统示意图

Fig.1 Busbar differential protection

图 2 为系统故障增量图,由故障点 K_1 看进去的阻抗由式(2)计算的结果:

$$Z_r = Z_{r1} Z_{r2} / (Z_{r1} + Z_{r2})$$

如果故障后 TA_2 没有饱和,测量阻抗 Z 可以由系统等效阻抗 Z_r 表示,且恒定不变。

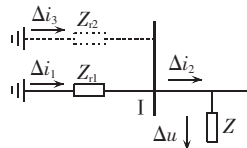


图 2 系统故障增量图

Fig.2 System fault increment map

如果故障后 TA_2 开始饱和,由于饱和区 TA_2 的电流变小,这时在饱和区测得的阻抗会变大,非饱和区的阻抗仍是系统阻抗,这样以二次电流、电压为基准测得的饱和点前后系统阻抗 Z_r 会发生变化。同理,如果 TA_1 或 TA_3 饱和,以该互感器的位置观测的系统阻抗也会发生变化。

可见,依据二次测量阻抗是否变化,可以定位哪一个 TA 饱和,文献[12]作了详尽分析。

2 虚拟阻抗模型 TA 饱和判据

对差动保护而言,以母线为例,如果连接的支路较多(如图 2 的虚线支路),按式(2)逐一采用每个

TA 测得的电流和保护安装处的电压计算而得的阻抗判别哪一个 TA 饱和^[12],计算量大(文献[12]所做分析),而且按照文献[12]的分析存在 2 个问题。

a. 检测 TA 饱和的门槛 Z_{rset} 不易整定,在系统结构不发生变化情况下,可以事先算出在保护安装点的二次等效系统阻抗,如后面仿真试验已知 $Z_{rset} = 2.906 \Omega$ 。实际运行的系统,由于运行方式的变化,连接支路的增加或减少,在同一点看进去的系统等效阻抗均不同,所以门槛很难整定。如果改用判别每组数据测得的阻抗变化(比值),同样可以判别出哪一个 TA 饱和,而且在定值的整定方面容易些。

b. 对于差动保护,用此方法可知某一 TA 是否饱和,但无法知道是区内还是区外故障造成 TA 饱和。

差动保护应用中,只需准确判别出区外故障 TA 饱和和保护不误动,区内故障 TA 饱和保护可靠动作。在此采用虚拟阻抗模型,考虑差流的变化(TA 饱和影响差流的变化),无需关心每个 TA 测得的电流的变化(即计算而得的阻抗变化)判别哪一个 TA 饱和,计算量允许时可以用于定位哪一个 TA 饱和。

如果采用比率制动原理,对 M 条支路而言,母线保护差流和制动电流关系表示如下:

$$i_d = \left| \sum_{j=1}^M i_{j2} \right|, \quad i_r = \sum_{j=1}^M |i_{j1}|, \quad i_d \geq k i_r$$

如果用故障增量模型,故障增量差流表述如下:

$$\Delta i_d = \sum_{j=1}^M \Delta i_{j2}$$

图 2 所示单侧电源故障增量模型,在母线处增加一条虚拟支路(这里区别于故障接地支路),虚拟支路的电流为差流 Δi_d ,虚拟阻抗为 Z_k 。在近母线处发生故障,故障点的增量电压可以由母线的增量电压表述(图 3 所示)。讨论区内外故障 TA 饱和的情况。

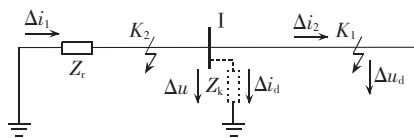


图 3 虚拟阻抗支路故障增量模型

Fig.3 Fault increment model with virtual impedance branch added

设定 $\Delta i'_d$ 为无任何 TA 饱和情况的故障增量差流。图 3 区外 K_1 点故障, TA_2 饱和:

非饱和区(差流近似为零,虚拟阻抗很大)

$$\Delta i_d = \Delta i_1 + \Delta i_2 \approx 0, \quad Z_k \gg Z_r$$

饱和区(差流增加,虚拟阻抗不再很大)

$$\Delta i_d = \Delta i_1 + \Delta i_2 > \Delta i'_d, \quad Z_k = k Z_r$$

k 大于 1 但很小。

区内 K_2 点故障, TA_1 饱和:

非饱和区

$$\Delta i_d \approx \Delta i_1, \quad Z_k \approx Z_r$$

饱和区

$$\Delta i_d = \Delta i_1 < \Delta i'_d, \quad Z_k = k Z_r$$

k 大于 1 但很小。

分析可知,对单侧电源系统,区外故障任一 TA

饱和,故障时刻到 TA 饱和前,虚拟阻抗远大于系统阻抗(由于差流很小),饱和后虚拟阻抗减小接近于系统阻抗,但仍大于系统阻抗(实际相当于差流有所增加,不再很小),虚拟阻抗在 $\infty \sim k$ 倍等值系统阻抗之间变化,饱和程度越深,虚拟阻抗变化越明显。区内故障任一 TA 饱和,饱和前虚拟阻抗等于系统阻抗(实际就是实测的二次系统等效阻抗),饱和后虚拟阻抗增加,大于系统阻抗(由于饱和后电流有所减小),虚拟阻抗在 $1 \sim k$ 倍等值系统阻抗之间变化,饱和程度越深,虚拟阻抗变化也越明显。

对于双侧或多侧电源(图4),分析区内外故障 TA 饱和情况。图5分析母线 I 差动保护区内外故障 TA 饱和对它的影响。同样在母线 I 近处发生故障,故障点的增量电压可由母线 I 的增量电压表述。

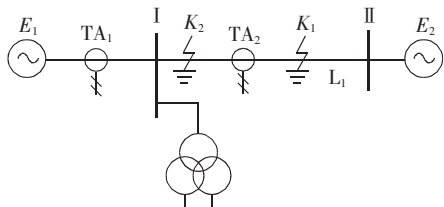


图4 双侧电源系统模型

Fig.4 Model of dual power source system

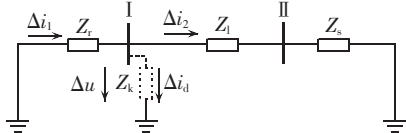


图5 双侧电源虚拟支路故障增量模型

Fig.5 Fault increment model of dual power source system with virtual impedance branch added

如果区内任意 x 处发生故障,由故障点看进去的系统阻抗为

$$Z_{\text{req}} = \frac{(Z_r + xZ_l)[Z_s + (1-x)Z_l]}{Z_r + Z_l + Z_s}$$

母线 I 区外 K_1 点故障,TA₂ 饱和:

非饱和区

$$\Delta i_d = \Delta i_1 + \Delta i_2 \approx 0, Z_k \gg Z_{\text{req}}$$

饱和区

$$\Delta i_d = \Delta i_1 + \Delta i_2 > \Delta i'_d, Z_k = k Z_{\text{req}}$$

k 大于 1 但很小。

母线 I 区内 K_2 点故障,TA₂ 饱和:

非饱和区

$$\Delta i_d = \Delta i_1 + \Delta i_2, Z_k \approx Z_{\text{req}}$$

饱和区

$$\Delta i_d = \Delta i_1 + \Delta i_2 > \Delta i'_d$$

$$Z_k = Z_r \cdot k' \cdot (Z_l + Z_s) / [Z_r + k' \cdot (Z_l + Z_s)] = k Z_{\text{req}}$$

k 大于 1 但很小。

同理,对多侧电源系统,如果区外故障任一 TA 饱和,故障时刻到 TA 饱和前,虚拟阻抗远大于系统阻抗(差流很小),饱和后虚拟阻抗减小,但仍大于系统阻抗(差流增加),虚拟阻抗在 $\infty \sim k$ 倍等值系统阻抗之间变化,饱和程度越深,虚拟阻抗变化越明显。

如果发生区内故障任一 TA 饱和,饱和前虚拟阻抗等于系统等值阻抗(实测的系统二次等效阻抗),饱和后虚拟阻抗增加,等于 k 倍系统等值阻抗(差流有所减小),与饱和程度有关,虚拟阻抗在 $1 \sim k$ 倍等值系统阻抗之间变化。

归纳虚拟阻抗变化规律,分析可知,无论单侧还是多侧电源,有如下关系成立:

区外故障 TA 饱和

$$Z_{k2} / Z_{k1} = k \ll 1 \quad (3)$$

区内故障 TA 饱和

$$Z_{k2} / Z_{k1} = k > 1 + m \quad (4)$$

这里, $m > 0$, Z_{k1} 表示故障时刻到 TA 饱和前的虚拟阻抗值, Z_{k2} 表示 TA 饱和后的虚拟阻抗值,由式(2)求出。如果无 TA 饱和,一个周期内虚拟阻抗基本无变化, $Z_{k1} \approx Z_{k2} \approx Z_{\text{req}}$ 。

在图5母线 I 处的线路差动保护,虚拟支路设定在母线 I 保护处,区外故障 TA 饱和时,取母线 I 的增量电压和增量差流分析,同样可得式(3)的结论。同理在母线 II 处线路差动保护虚拟阻抗支路在母线 II 处,可得同样结论。

x 处故障电压增量:

$$\Delta u_d = \Delta u (Z_r + xZ_l) / Z_r = p \Delta u$$

由于无法取得距离 x 处的故障增量电压,采用保护安装处母线的电压增量 Δu 计算阻抗参数,虚拟阻抗相当于缩小了 $1/p$ 。式(4)是用比值关系描述,故 p 值对结果无影响。所以区内外任何一点故障,均可以用保护安装处的电压增量和差流增量表述式(4)的关系,结论一样。

如果是变压器保护,图5中的 Z_l 换成 Z_T ,区内外故障仍然可以用一侧母线处的电压增量和差流增量来表述式(3)和(4)的关系。在空投变压器时,由于变压器励磁支路影响,变压器等效 Z_T 具有非线性,在判别门槛时要适当考虑,考虑到有判别涌流的制动判据,故本判据的使用不受影响。

这里采用饱和前后阻抗的比值变化,如式(3)(4)所示,无需知道系统等效阻抗的大小,而且不受保护安装处和故障点之间实际阻抗的影响。

3 仿真试验

图5所示母线 I 差动保护,源阻抗为 $Z_r = Z_s$ ($R = 3 \Omega, L = 0.05 \text{ H}$), Z_l ($R = 1 \Omega, L = 0.076 \text{ H}$), 电流互感器 TA₂ 变比为 2000/5 A, 电压互感器变比为 220 kV/100 V(线), 计算得 $Z_r = Z_s = 15.984 \Omega$, $Z_l = 23.885 \Omega$, 按照变比折算后的二次源阻抗值为 2.906Ω , 线路阻抗值为 4.343Ω 。用 Matlab 仿真模拟区内外故障 TA₂ 饱和,分析在故障点测得的阻抗变化值以及虚拟阻抗变化值。仿真时间为 0.1 s,故障时刻为 0.02 s,每周采集 48 点。图6为区外 K_1 点故障,TA₂ 发生轻度饱和,记录的饱和 TA₂ 的一次电流 I_p 和二次电流 I_s , 以及励磁电流 I_m (归算到二次侧)。

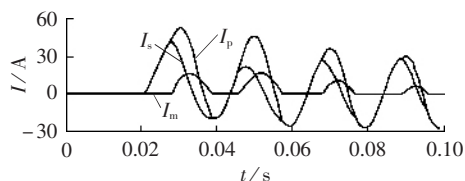


图 6 区外故障饱和 2 号电流互感器的一、二次电流及励磁电流

Fig.6 Primary & secondary currents and excitation current of saturated CT₂ caused by out-zone fault

图 7 所示为在故障点 K_2 观测到的 I 侧系统阻抗二次值。在非饱和区,测得的阻抗值等于系统阻抗值(图中虚线),在饱和区测得的阻抗值大于系统阻抗值。符合前面分析的结论。

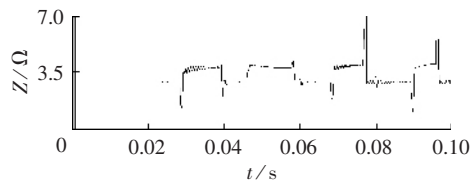


图 7 2 号电流互感器饱和后故障点测得的系统阻抗值

Fig.7 System impedance measured at fault point when CT₂ is saturated

图 8 为图 5 所示虚拟支路虚拟阻抗变化值,饱和前,虚拟阻抗 Z_{k1} 很大,饱和后虚拟阻抗 Z_{k2} 接近系统源阻抗, Z_{k2}/Z_{k1} 很小。符合式(3)结论。

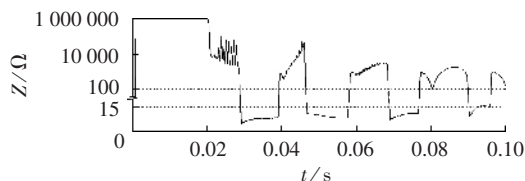


图 8 区外故障 2 号电流互感器饱和时的虚拟阻抗值

Fig.8 Virtual impedance when CT₂ saturation is caused by out-zone fault

如果 TA₂ 发生深度饱和(图 9 所示),在故障点测得的 I 侧系统阻抗如图 10 所示。虚拟阻抗值如图 11 所示, Z_{k2}/Z_{k1} 仍然很小。符合前面分析结果。

区内 K_2 点故障,由前面设定的参数可知,从故障点看进去的系统等效阻抗 Z_{req} 为 2.074Ω ,当 TA₂ 轻度饱和或严重饱和(图 12 和 13),虚拟阻抗分别如图 14 和 15 所示, Z_{k2}/Z_{k1} 均大于 1。

模拟母线 I 差动保护各种区内外故障 TA 饱和情况,均有式(3)(4)规律,它可以可靠闭锁或开放差

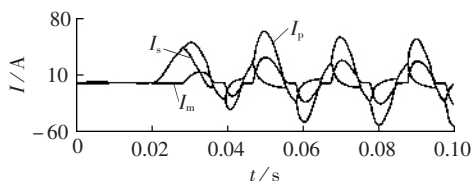


图 9 区外故障深度饱和 2 号电流互感器的一、二次电流及励磁电流

Fig.9 Primary & secondary currents and excitation current of deeply saturated CT₂ caused by out-zone fault

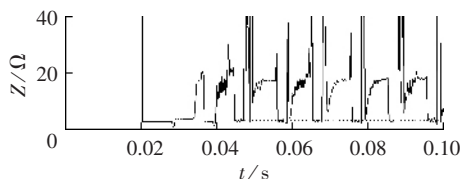


图 10 2 号电流互感器深度饱和时测得的系统阻抗值

Fig.10 System impedance measured at fault point when CT₂ is deeply saturated

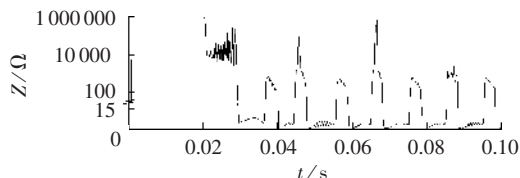


图 11 区外故障 2 号电流互感器深度饱和时的虚拟阻抗值

Fig.11 Virtual impedance when CT₂ deep saturation is caused by out-zone fault

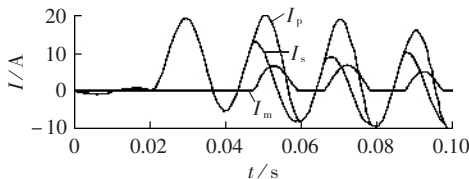


图 12 区内故障饱和 2 号电流互感器的一、二次电流及励磁电流

Fig.12 Primary & secondary currents and excitation current of deeply saturated CT₂ caused by in-zone fault

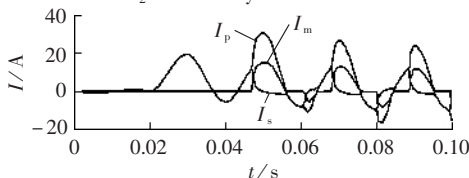


图 13 区内故障深度饱和 2 号电流互感器的一、二次电流及励磁电流

Fig.13 Primary & secondary currents and excitation current of deeply saturated CT₂ caused by in-zone fault

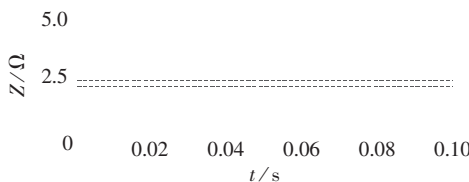


图 14 区内故障 2 号电流互感器饱和时的虚拟阻抗值

Fig.14 Virtual impedance when CT₂ saturation is caused by in-zone fault

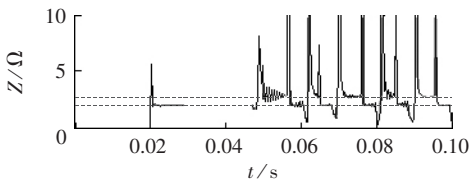


图 15 区内故障 2 号电流互感器深度饱和时的虚拟阻抗值

Fig.15 Virtual impedance when CT₂ deep saturation is caused by in-zone fault

动保护。试验和仿真证明,虚拟阻抗检测法不但可定位 TA 饱和,还可判别最严重的 TA 饱和情况,如故

障后 2 ms 开始的 TA 饱和,但要求采样不低于 40 点。事实上,即使短路电流大于 100 倍额定电流时,TA 二次线性转变电流时间至少 2 ms,所以一般在故障后 2 ms 以上才开始饱和。仿真线路或变压器差动保护区内外故障 TA 饱和,可得到相同的结论。

4 结论

采用虚拟阻抗模型,可定位哪个 TA 饱和,能够准确判别出区内外故障 TA 饱和是否闭锁差动保护,在保证一定采样点数情况下,它可判别出严重的 TA 饱和情况。由于采用短数据窗算法,保护动作快。且式(3)(4)具有较大灵敏度,提高了判据的可靠性。

参考文献:

- [1] 陈三运. 一起 CT 饱和引起的继电保护拒动行为[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 85-87.
CHEN San-yun. Analysis of a misoperation of protection device caused by saturation of current transformer[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 85-87.
- [2] 陈建玉, 孟宪民, 张振旗, 等. 电流互感器饱和对继电保护的影响的分析和对策[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 54-56.
CHEN Jian-yu, MENG Xian-min, ZHANG Zhen-qi, et al. Influence of the current transformer saturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 54-56.
- [3] 程利军, 龙翔, 杨奇逊. 基于采样值的 CT 饱和检测方案的研究[J]. 继电器, 2000, 28(8): 19-21.
CHENG Li-jun, LONG Xiang, YANG Qi-xun. The research of the sampling method for CT saturation in numeric busbar protection[J]. Relay, 2000, 28(8): 19-21.
- [4] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器, 2001, 29(11): 1-4, 8.
LI Yan, CHEN De-shu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA's saturation[J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4, 8.
- [5] 沈全荣, 严伟, 梁乾兵, 等. 异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 84-86.
SHEN Quan-rong, YAN Wei, LIANG Qian-bing, et al. Asyn-
- chronous method for the recognition of current transformer saturation and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 84-86.
- [6] 李丽, 都洪基, 刘林兴, 等. 计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 69-72.
LI Li, DU Hong-ji, LIU Lin-xing, et al. Research on confirming CT's saturation in busbar protection by calculating harmonic ratio[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 69-72.
- [7] 项巍, 吕航, 李力, 等. 母线保护中电流互感器深度饱和的辅助判据[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 39-42.
XIANG Wei, LÜ Hang, LI Li, et al. Distinguish current transformer's extreme saturation by waveform discrimination of branch current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 39-42.
- [8] 李瑞生, 路光辉, 王强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判据[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 70-73.
LI Rui-sheng, LU Guang-hui, WANG Qiang. Transformer saturation criterion for line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 70-73.
- [9] 张新刚, 王泽忠. 采用电压波形特征的电流互感器饱和检测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 59-63.
ZHANG Xin-gang, WANG Ze-zhong. A method detecting current transformer saturation by utilizing features of secondary voltage waveform[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 59-63.
- [10] KANG Y C, PARK J K, KANG S H, et al. An algorithm for compensating secondary currents of current transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 116-124.
- [11] KANG Yong-cheol, OK Seung-hun, KANG Sang-hee. A CT saturation detection algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 78-85.
- [12] FERNANDEZ C. An impedance-based CT saturation detection algorithm for bus-bar differential protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 468-472.

(责任编辑: 李玲)

作者简介:

赵永彬(1971-), 男, 四川南部人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: zyb857@163.com);

陆于平(1962-), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 长期从事电力系统主设备继电保护方面的科研和教学工作。

Current transformer saturation criterion based on virtual impedance model

ZHAO Yong-bin, LU Yu-ping

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An algorithm based on virtual impedance model is presented, which can effectively detect CT (Current Transformer) saturation caused by in-zone or out-zone fault to avoid its effect on differential protection. In some differential protections for transmission line, bus bar, main equipment, etc., CT saturation caused by the big short-circuit current when an out-zone fault occurs may result in their misoperation. The secondary equivalent impedance at the protection installation location can be measured using short-data window algorithm based on RL model, which is treated as a virtual impedance branch added to the fault increment model. Its virtual impedance is obviously changed when CT saturation happens during out-zone or in-zone fault. The law of impedance change under CT saturation is analyzed and used to distinguish the CT saturation of out-zone fault from the CT saturation of in-zone fault for blocking differential protection.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50577006).

Key words: current transformer saturation; differential protection; short-data windows; fault increment; virtual impedance