

利用等效瞬时阻抗模值特征的母线保护

索南加乐, 邓旭阳

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 利用模型参数识别的思想,提出了一种利用等效瞬时阻抗模值特征的母线保护原理.将母线故障状态等效为一个 LR 模型,通过对模型参数的识别以及所定义的等效瞬时阻抗模值变化特征的分析,构造了两种实用的母线保护方案,可准确判断出母线的区内、外故障状态.与传统的母线保护相比,基于新原理的母线保护在区外故障且电流互感器(TA)饱和时能够可靠制动,无需配备专门的TA饱和识别元件,保护判据简单、易整定,具有较高的灵敏度,而且保护本身对于非周期分量和各次谐波均适用,无需滤波,动作速度更快,同时还具有天然的不受 $3/2$ 断路器接线的母线区内故障时汲出电流影响的特性,以及具有较强的抗过渡电阻能力.EMTP 仿真结果证明了该母线保护原理的正确性和可行性.

关键词: 参数识别;母线保护;等效瞬时阻抗;电流互感器饱和;线性传变区

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0043-07

Equivalent Instantaneous Impedance Based Bus-Bar Protection

SUONAN Jiale, DENG Xuyang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Following the parameter identification principle, a novel equivalent instantaneous impedance based bus-bar protection is proposed. An inductance model is developed when the internal fault occurs on the bus. Identifying the parameters of the model and analyzing the defined characteristic of the equivalent instantaneous impedance, two practical bus-bar protection criterions are put forward for distinguishing the internal fault from the external fault correctly. Compared with the traditional bus-bar protections, the current transformer saturation detection unit gets unnecessary for bus-bar protection, and the thresholds of the criterions are easy to set with high sensitivity. The new principle is suitable for non-periodic component, fundamental component and harmonic component. EMTP simulation shows the high sensitivity and reliability.

Keywords: parameter identification; bus-bar protection; equivalent instantaneous impedance; current transformer saturation; linear zone

母线是电力系统输配电的枢纽,在高压电网中配备快速灵敏、可靠性高、安全性好的母线保护装置尤为重要^[1-2].微机母线保护目前主要采用电流差动式保护原理,并大多建立在工频量的基础之上,受滤波器的影响,其动作速度很难提高,而且抗电流互感器(TA)饱和能力较差^[3].国内外的继电保护工作者为此提出了各种TA饱和识别元件^[4-6],一旦识别出

TA饱和,立即将母线保护闭锁,这虽然在一定程度上能够解决TA饱和对母线差动保护的影响,但在实际运行中仍出现不少区外故障时保护误动、区内故障时保护动作延迟甚至拒动等严重情况.

由于TA从故障前的线性传变状态变化到故障后的严重饱和状态需要一定的时间(3~5 ms),于是相关学者提出了基于暂态行波的母线保护原理^[7-8],

以期抢在 TA 饱和和发生之前完成母线区内、外故障的快速判别,从而避免 TA 饱和的影响.然而,基于行波的母线保护原理受故障初相角的影响较大,在发生电压过零点故障时会失效,而且缺乏装置设计开发和运行实践,在可靠性上尚存在不足.

为了解决母线保护存在的问题,提高母线保护的動作性能,本文利用参数识别的思想,提出了一种基于等效瞬时阻抗模值特征的母线保护原理,EMTP 仿真结果证明了该母线保护原理的正确性和可行性.

1 母线等效瞬时阻抗的定义

本文以单相单母线模型为例,建立母线区内故障时的等效电路模型.假设母线上有 n 条支路,电流以母线流向线路的方向为正.当母线上 F 点发生故障时,其故障附加状态如图 1 所示.由图 1 可知,此时对于各条支路均有

$$\Delta u = L_i \frac{d\Delta i_i}{dt} + R_i \Delta i_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: Δu 为母线上电压的变化量; Δi_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为流经各支路的故障分量电流,此时母线差

$$\Delta i_{cd} = \sum_{i=1}^n \Delta i_i.$$

假设图 1 中各支路阻抗的阻抗角近似相等,且 Δi_{cd} 在各支路上的分支系数 k_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为实数,则母线区内发生故障时的故障附加状态可进一步等效为一个电感电路模型(见图 2)

$$\Delta u = L_{eq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} + R_{eq} \Delta i_{cd} \quad (2)$$

$$\text{式中: } L_{eq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i L_i; R_{eq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i R_i.$$

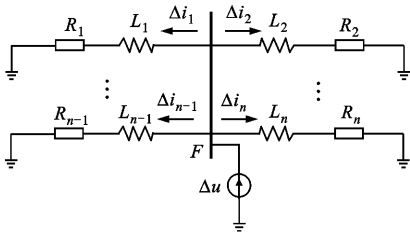


图 1 母线区内发生故障时的故障附加状态

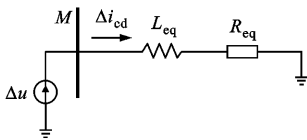


图 2 母线区内发生故障时的故障附加状态等效网络图

当实际故障发生时,根据采样所得的电压和电流信号,可识别出模型中的参数 L_{eq} 、 R_{eq} .为了减小采样误差、计算误差以及噪声给参数估计带来的波动性以得到更为精确稳定的解,本文使用了最小二乘法来计算等效模型参数.

由于在超/特高压系统中,电感一般是电阻的 4 ~ 10 倍,可以忽略模型中电阻分量 R_{eq} 的影响,因此,本文定义识别参数的等效瞬时阻抗值为

$$Z_L = | \omega_0 L_{eq} | \quad (3)$$

式中: $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为工频频率.

2 等效瞬时阻抗模值的变化特征

2.1 母线区内故障

2.1.1 母线区内发生故障但 TA 正常传变 当母线区内发生故障时,由于超/特高压系统中系统阻抗角和线路阻抗角都近似相等,因此根据图 2 及文献 [9-10] 的分析可知,求解出的等效瞬时阻抗 Z_L 反映母线上所连各支路阻抗的并联,其值小于最小的支路阻抗值,通常只有几十欧,且数值稳定,不随时间变化.若将母线各支路阻抗的并联值记为 Z_s ,则有

$$Z_L = Z_s \quad (4)$$

2.1.2 母线区内发生故障且 TA 饱和 事实上,当母线发生区内故障时,由于各支路上仅流过其自身的短路电流,因此短路容量不会很大,TA 可能由于铁芯剩磁等原因出现轻微饱和,严重饱和情况一般不会发生.此时的母线差流为所有支路的故障电流之和,尽管某一支路 TA 饱和使其二次电流波形有一定程度的变化,但是对整个差流的波形影响不大.图 3 给出了母线区内发生故障且 TA 饱和时差流的典型时域波形.

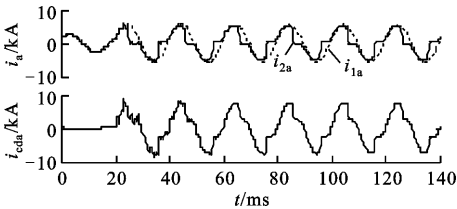


图 3 母线区内发生故障且 TA 饱和时的电流波形

由图 3 可知,此时母线差流的变化与饱和 TA 的二次侧电流变化类似,在 TA 饱和时差流会有所减小,因此在 TA 饱和前后根据式(2)计算出的等效瞬时阻抗值 Z_L 具有如下的变化特征.

(1)在非饱和区域,差流为正常的母线故障电流,因此计算得到的等效瞬时阻抗值依然反映母线各支路阻抗的并联值

$$Z_L = Z_s \tag{5}$$

(2)在饱和区域,母线差流有所减小,若假设图 1 中支路 n 上的 TA 饱和且二次电流在饱和区内输出为 0,则此时母线差流依然等于其余各支路的短路电流之和: $\Delta i_{cd} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta i_i$. 由于母线上通常都连有多条支路,某一支路电流下降对整个差流的影响不大,且母线区内发生故障时一般不会发生 TA 严重饱和,因此在饱和区内的差流下降不多,即使假设 TA 饱和前有 $\Delta i_n = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta i_i$,则在饱和区内计算得到的等效瞬时阻抗值 $Z_L = 2Z_s$. 由此可知,母线区内发生故障时利用饱和区域差流计算得到的等效瞬时发生阻抗值虽有所增加,但变化不大

$$Z_L \approx kZ_s, \quad 1 < k < 2 \tag{6}$$

同样,由图 3 可知,由于 TA 的饱和周期为 10 ms,在每 10 ms 的过零点处都存在线性传变区,因此母线差流波形中的饱和区域周期也为 10 ms,使得识别计算出的每 10 ms 的等效瞬时阻抗值具有类似图 4 所示的直观的变化特征. 可见,利用饱和区域的差流与非饱和区域的差流计算出的等效瞬时阻抗值相差不大,通常都只有几十欧.

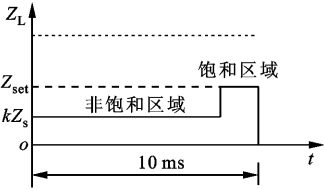


图 4 母线区内发生故障且 TA 饱和时 Z_L 的变化特征

综上所述,当母线区内发生故障时,无论 TA 工作状态如何,识别出的 Z_L 始终接近于 Z_s ,数值较小且相对稳定.

2.2 母线区外故障

母线区外故障时的故障附加状态如图 5 所示,故障点 F 位于支路 n 上,其中 C 为母线对地的杂散电容.

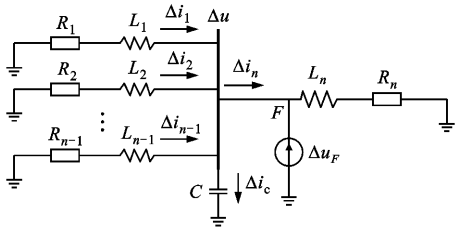
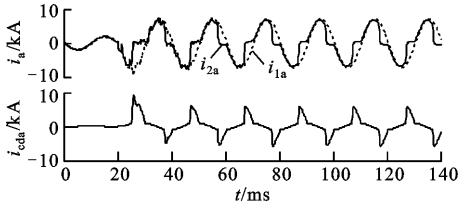


图 5 母线区外发生故障时的故障附加状态

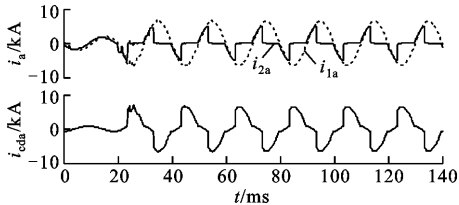
2.2.1 母线区外发生故障且 TA 正常传变 当母线区外发生故障各支路 TA 均正常传变时,母线差流接近于 0,由图 5 易知,其在理论上等于母线对地的电容电流,即 $\Delta i_{cd} = -\Delta i_c$. 若忽略各支路中的电阻分量并结合文献[9-10]中的分析可知,此时求解出的等效瞬时阻抗值 $Z_L = \left| \frac{1}{\omega_0 C} \right|$. 因此,母线区外发生故障时, Z_L 可近似反映母线的杂散容抗值,其值很大,通常可达上万欧,故有

$$Z_L \gg Z_s \tag{7}$$

2.2.2 母线区外发生故障且 TA 饱和 图 6 为母线区外发生故障且 TA 轻度饱和与严重饱和时的典型时域电流波形(当每半周电流波形中的饱和区域小于等于 5 ms 时,本文认为属于 TA 轻度饱和状态,当饱和区域大于 5 ms 时为 TA 严重饱和状态). 由图 6 可知,区外发生故障时母线差流在数值上就等于饱和 TA 的二次电流缺损部分,随着 TA 饱和程度的加深,二次电流波形缺损的程度也随之加剧,但是差流波形却趋于规则的正弦波. 由于在饱和区内差流增大,而非饱和区内差流接近于 0,因此根据式(2)计算出的 Z_L 具有如下的变化特征.



(a)母线区外发生故障且 TA 轻度饱和



(b)母线区外发生故障且 TA 严重饱和

图 6 母线区外发生故障且 TA 不同程度饱和时的电流波形

(1)在非饱和区域,由于故障发生后 TA 不会立即进入饱和,始终有线性传变区存在,因此无论 TA 饱和程度如何,母线差流非饱和区域始终存在近似反映母线的电容电流,因此同区外发生故障无 TA 饱和时一样,此时计算得到的等效瞬时阻抗值近似反映母线的杂散容抗值

$$Z_L \gg Z_s \tag{8}$$

(2)在饱和区域,假设故障支路 n 上的 TA 二次电流在饱和区内降为 0,则此时母线差流等于其余各支路的短路电流之和.由图 5 可知,此时计算出的 Z_L 为除故障支路之外的其余各支路阻抗的并联值 Z'_s .由于 TA 饱和前有 $\Delta i_n = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta i_i$,因此支路 n 的等效瞬时阻抗 $Z_{Ln} = Z'_s$,满足 $Z_s = Z'_s/2$.由于在饱和区内通常尚有一定的 TA 二次电流,因此实际计算出的 Z_L 应略小于 Z'_s ,故此时的等效瞬时阻抗值为

$$Z_L \approx kZ_s, \quad 1 < k < 2 \quad (9)$$

从图 6 亦可看出,由于故障发生后,TA 在饱和前以及其后每 10 ms 内的过零点处始终有线性传变区存在,因此即使发生严重饱和的情况,母线差流在故障后的最初阶段以及其后的过程中都始终有非饱和区域存在.因此,对于不同程度的 TA 饱和,利用式(2)计算出的每 10 ms 的等效瞬时阻抗具有近似图 7 所示的直观的变化特征,而且非饱和区域与饱和区域的数值相差很大.

综上所述,当母线区外发生故障时,若 TA 正常传变,计算得到的等效瞬时阻抗近似反映母线的杂散容抗值,数值很大.若有 TA 饱和,则在故障后最初的 5 ms 内计算得到的等效瞬时阻抗以及每 10 ms 的等效瞬时阻抗中都存在高值阻抗.因此,当母线区外发生故障时始终有高值阻抗存在.

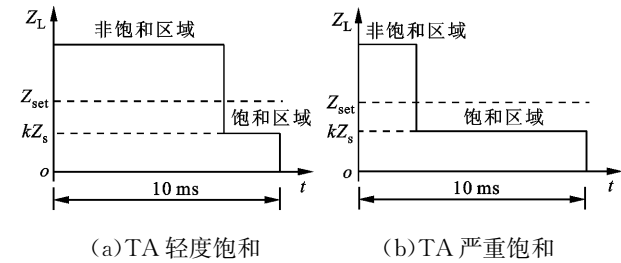


图 7 母线区外发生故障且 TA 饱和时 Z_L 的变化特征

3 母线保护方案及动作判据

通过以上分析可知,本文引入了母线电压来建立故障等效模型,由于母线电压不受 TA 饱和的影响,因此使得母线区内发生故障且 TA 正常传变时,识别出的等效瞬时阻抗是一个稳定的数值,从而为保护衡量区内、外故障以及 TA 饱和提供了参考.加之识别出的等效瞬时阻抗值在母线区内、外故障时的特征明显,反差较大,因此可以根据故障后计算得到的等效瞬时阻抗来判别母线的区内、外故障.

由于母线在区内、外故障时计算出的等效瞬时

阻抗反差很大,因此可以在二者之间取一个阻抗门槛值 Z_{set} ,如图 4 和图 7 中所示.一旦计算出的等效瞬时阻抗 $Z_L(k) > Z_{set}$ 时,即认为是高值阻抗,判为母线区外故障.由于等效瞬时阻抗在母线区内故障且 TA 正常传变时始终小于最小的支路阻抗值,与区外故障时反差很大,因此 Z_{set} 的选取也非常容易,本文取 $Z_{set} = 300 \Omega$ 已具有足够的可靠性,若保护配有差流起动元件,则在实际应用中可整定为 $\frac{U_N}{I_{cdz}}$,其中 U_N 为母线额定电压, I_{cdz} 为差流起动定值.

3.1 保护方案 1

母线区外发生故障时,由于 TA 在饱和前始终存在 3~5 ms 左右的线性传变区,使得在故障发生后最初的 5 ms 内计算出的等效瞬时阻抗中存在高值阻抗,而母线区内故障时始终没有高值阻抗,因此利用这一规律可构成快速动作的母线保护判据.

(1) 启动判据

$$|\Delta u| > 1.25\Delta U_T + \Delta U_{dz} \quad (10)$$

(2) 动作判据

$$Z_L(t) < Z_{set}, \quad t = 5 \text{ ms} \quad (11)$$

当故障发生后有连续 5 ms 的数据满足式(11)时,即可判为母线内部发生故障.

式(10)为母线电压突变量启动判据,其中 ΔU_T 为母线电压变化量浮动门槛,随着变化量输出增大而逐步自动提高,取 1.25 倍可保证门槛电压始终略高于不平衡输出,提高安全性,减少不必要的频繁启动,且具有较高的灵敏度. ΔU_{dz} 为固定门槛,通常取为 $0.05U_N$,无论何种故障,判据都能自适应地灵敏启动.

3.2 保护方案 2

当母线区外发生故障时,由于饱和 TA 在每 10 ms 内的过零点处始终存在线性传变区,因此计算得到的每 10 ms 的等效瞬时阻抗中也存在高值阻抗.母线区内发生故障时始终没有高值阻抗存在,因此利用这一规律同样可构成能够准确判别母线区内外故障的保护动作判据

$$Z_L(t) < Z_{set}, \quad t = 10 \text{ ms} \quad (12)$$

当故障发生后有连续 10 ms 的数据满足式(12)时,即可判为母线内部发生故障.

通过对比可知,方案 1 在母线发生故障后 5 ms 即可快速动作切除故障,但是该方案对故障发生时刻的准确捕捉有较高的要求,仅在故障后较短时间内投入.与方案 1 相比,方案 2 虽然动作速度相对较慢,但是对故障发生时刻的准确捕捉没有较高的要

求,可在故障后较长时间内投入.因此,实际运行中将方案 1 与方案 2 配合使用,具有更好的可靠性和安全性.

4 性能分析

4.1 母线区外发生故障且 TA 饱和时能够可靠制动

目前,TA 饱和识别元件均采用一旦发现 TA 饱和直接闭锁母线差动保护的策略,闭锁时间通常达到 100 ms 以上.当母线区内发生故障且 TA 饱和时,或者发生转换型故障时,将不可避免地影响母线保护的動作性能,延长故障的切除时间,对系统的稳定运行带来隐患.

本文提出的母线保护判据充分利用了母线区内、外发生故障时等效瞬时阻抗的变化特征.当母线区外发生故障时,无论 TA 饱和与否,由于始终存在高值阻抗,因此保护均能够可靠制动,而无需配备专门的 TA 饱和识别元件闭锁母线保护,既提高了母线保护在区外故障时的安全性,又使得发生转换性故障或区内故障且 TA 饱和时保护的動作速度不受任何影响,保证了故障的快速切除,有利于系统的稳定运行.

4.2 比现有的抗 TA 饱和措施性能可靠

母线差动保护目前配备的抗 TA 饱和措施主要有同步法和谐波类判据^[5].同步法只解决了在故障初始时刻判别 TA 是否饱和的问题,随后便会退出,对于 TA 饱和后的转换性故障却无法区分.谐波类判据计算谐波时需要一定的数据窗,一方面使得保护的動作速度受到限制;另一方面,由于母线区内发生故障且 TA 饱和时也存在谐波分量,可能会造成保护的误闭锁,延长了故障切除时间;再次,由于受系统故障电流谐波的干扰,谐波类判据的门槛值也不易整定,保护边界不明确.

本文提出的保护原理引入了母线电压来建立故障等效模型.由于母线电压不受 TA 饱和的影响,使得母线区内发生故障且 TA 正常传变时,识别出的等效瞬时阻抗是一个稳定值,从而为保护衡量区内、外故障以及 TA 饱和提供了依据,加之识别出的等效瞬时阻抗在区内、外故障时的特征明显,反差较大,因此保护動作判据容易整定.当本文所提的两种保护方案配合使用时,不仅能够在母线区外发生故障且 TA 饱和时使保护可靠制动,而且在发生转换性故障时保护也能够迅速動作.同时,基于时域的保护判据不受谐波的影响,理论本身对于非周期分量以及各次谐波均适用,因此動作性能更加安全可靠.

4.3 保护判据具有较好的适应性能

当 TA 饱和时,由于受二次负载影响,其二次电流的降落存在一个过程,且利用最小二乘法识别参数时受滑动数据窗的影响,使得实际计算出的等效瞬时阻抗在非饱和区与饱和区之间存在一个明显的过渡区,如图 8 所示,在非饱和区与饱和区之间具有明确的边界,而并非如图 4 和图 7 中所示的理想情况.

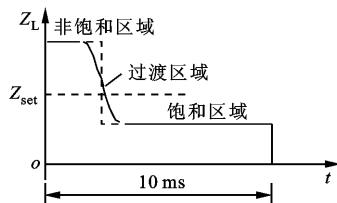


图 8 区外故障且 TA 饱和时 Z_L 的实际变化特征

可见,由于过渡区的存在,使得计算出的高值阻抗的数量在一定程度上受到 Z_{set} 的影响, Z_{set} 越大,高值阻抗相对数量越小,当 Z_{set} 过高时,有可能会造成保护的性能下降.由于高值阻抗与母线区内发生故障时的等效瞬时阻抗反差很大,通常只要在二者之间取值,能够满足母线区内发生故障时的可靠性和灵敏度要求即可.因此,阻抗门槛很容易选取且不需要取值较大,使得保护判据在实际应用时具有良好的适应性能.

5 仿真验证

为验证本文保护動作判据的有效性,利用文献[9]中的模型及参数进行仿真验证,其中饱和 TA 模型采用 EMTP 中的 Type98 非线性电感元件搭建,TA 变比取为 1 200/5.由于 TA 在故障发生后不会立即进入饱和,至少存在 3~5 ms 的线性传变区,因此本文采用的最小二乘法数据窗长为 2 ms,从而可在故障发生后快速地识别出等效阻抗加以判断.仿真试验中的采样频率为 10 kHz,可以在较短的计算时间内获取更多的信息,使得计算结果更加准确可靠.

5.1 母线区内故障时的仿真结果

图 9 和图 10 分别给出了母线区内发生 A 相接地故障时的仿真结果.从图 9 可以看出,当区内故障 TA 未饱和时,实时计算的等效瞬时阻抗值只有几十欧,远小于 Z_{set} ,且数值稳定.因此,方案 1 的動作判据在 5 ms 内即可動作于出口,而方案 2 的動作判据也能够正确動作.

从图 10a 可以看出,当母线区内发生故障且 TA 饱和时,计算出的等效瞬时阻抗有所增大,但依

然远小于 Z_{set} , 因此方案 1 能够快速、灵敏动作. 由于实时计算出的等效瞬时阻抗均小于 Z_{set} , 始终不存在高值阻抗, 因此方案 2 的动作判据同样能够正确动作.

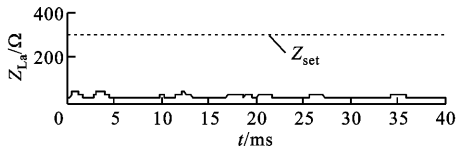
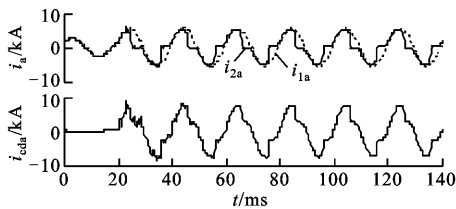
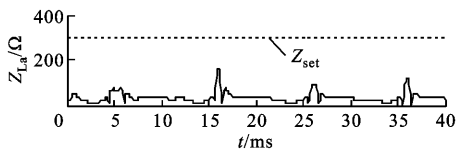


图9 母线区内发生 A 相接地故障且无 TA 饱和时的仿真结果



(a) TA 饱和时的电流波形及差流波形



(b) 仿真结果

图10 母线区内发生 A 相接地故障且 TA 饱和时的电流波形及仿真结果

由此可见, 母线区内发生故障时无论 TA 饱和与否, 保护的動作性能不受影响, 两种保护方案均能够快速、正确地动作.

5.2 母线区外发生故障时的仿真结果

图 11~图 13 分别为母线区外某条支路发生 A 相接地故障且 TA 未饱和、TA 轻度饱和以及 TA 严重饱和时得到的仿真结果.

由图 11 可知, 当母线区外发生故障时, 识别计算出的等效瞬时阻抗达到了上万欧姆, 始终大于 Z_{set} , 因此等效瞬时阻抗始终为高值阻抗, 此时方案 1 和方案 2 的動作判据均能够可靠制动.

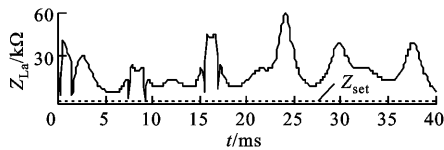
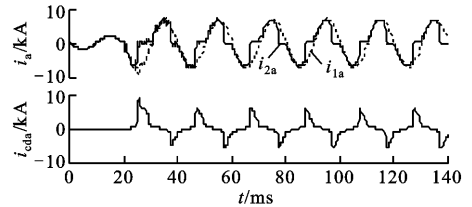


图11 母线区外发生 A 相接地故障时的仿真结果

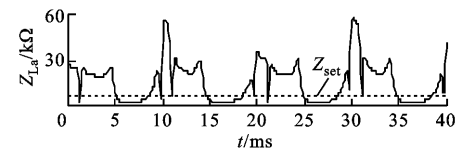
由图 12 可知, 当母线区外发生故障且 TA 轻度饱和时, 利用非饱和区域差流计算出的等效瞬时阻

抗非常大, 远大于 Z_{set} , 因而不满足方案 1 的動作判据, 保护能够可靠制动. 由于 TA 在每半周波内的过零点处都存在线性传变区, 因此实时计算出的每 10 ms 的等效瞬时阻抗中存在高值阻抗, 因此不满足方案 2 的動作判据, 保护同样能够可靠制动.

当母线区外发生故障且 TA 严重饱和时, 如图 13 所示, 此时同样不满足保护方案 1、2 的動作判据, 保护依然能够可靠制动.

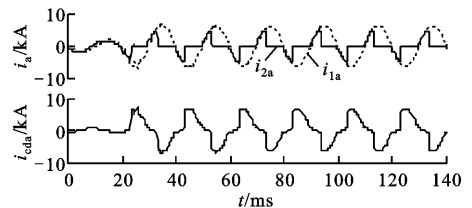


(a) TA 轻度饱和时的电流波形及差流波形

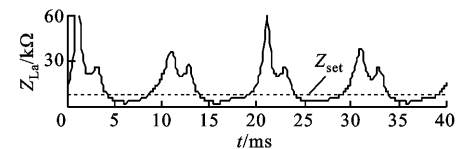


(b) 仿真结果

图12 母线区外发生 A 相接地故障且 TA 轻度饱和时的电流波形及仿真结果



(a) TA 严重饱和时的电流波形及差流波形



(b) 仿真结果

图13 母线区外发生 A 相接地故障且 TA 严重饱和时的电流波形及仿真结果

由此可见, 本文所提保护判据在母线区外发生故障且 TA 饱和时, 无论饱和程度如何, 均能够可靠制动, 从而大大提高了保护的抗 TA 饱和的能力.

6 结论

(1) 基于新原理的保护判据在母线区内、外发生故障时具有较高的可靠性和灵敏度. 区外发生故障

且 TA 饱和时,保护均能够实现可靠制动,而无需配置专门的 TA 饱和识别元件来闭锁母线保护;区内故障时无论 TA 饱和与否,保护的灵敏度也丝毫不受影响,保护均能够快速、正确地动作。

(2)新原理判据在母线区内、外发生故障时特征明显,具有较好的反差特性,保护判据简单、易整定,提高了母线区内、外发生故障时的保护动作的可靠性和安全性。

(3)原理本身对于非周期分量以及各次谐波都适用,与传统的母线差动保护相比,灵敏度高,动作速度快。

(4)由于本文采用最小二乘法来识别模型参数,计算数据窗较短,因此对于 TA 严重饱和的情况,若要获得准确可靠的判别结果,则需要对保护装置的采样率有一定的要求。但是,由于目前现场中微机保护的采样率相对较低,因此单从采样率来看,本文所提的母线保护新方法可能还无法很好地适应目前母线保护的动作要求,随着技术的发展,可作为未来超高速母线保护的一种备选方案。

参考文献:

- [1] 王春生,卓乐友,艾素兰. 母线保护[M]. 北京:中国电力出版社,1987.
- [2] 尹其云. 对当前继电保护运行方面几个问题的分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 1-3.
YIN Qiyun. Analysis of several typical problems in protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 1-3.
- [3] 宋方方,王增平,刘颖. 母线保护的现状及发展趋势[J]. 电力自动化设备,2003,23(7): 66-69.
SONG Fangfang, WANG Zengping, LIU Ying. Status quo and development tendency of busbar protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 66-69.
- [4] FERNANDEZ C. An impedance-based CT saturation detection algorithm for bus-bar differential protection[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2001, 16(10): 468-472.
- [5] 刘中平,陆于平,袁宇波. 数字差动保护抗电流互感器饱和的线性区方案[J]. 电力系统自动化,2007,31(4): 66-70.

- LIU Zhongping, LU Yuping, YUAN Yubo. Linear anti-saturation strategy of digital differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 66-70.
- [6] 黄志元,何奔腾,张雪松. 利用磁制动检测电流互感器饱和的实用化研究[J]. 电力系统自动化,2006, 30(4): 75-79.
HUANG Zhiyuan, HE Benteng, ZHANG Xuesong. Research on the practicality of current transformer saturation detection using the magnetic restraint principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 75-79.
- [7] 葛耀中,董杏丽,董新洲,等. 基于小波变换的电流行波母线保护的研究: 原理与判据[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 95-98.
GE Yaozhong, DONG Xingli, DONG Xinzhou, et al. A new busbar protection based on current traveling waves and wavelet transform: principle and criterion[J]. Transaction of CES, 2003, 18(2): 95-98.
- [8] 段建东,张保会,陈坚. 电流行波差动式母线保护的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(9): 43-48.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, CHEN Jian. Study on the current traveling-wave differential bus protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 43-48.
- [9] 索南加乐,邓旭阳,焦在滨,等. 基于故障分量综合阻抗的母线保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 1-5.
SUONAN Jiale, DENG Xuyang, JIAO Zaibin et al. A novel bus-bar protection based on fault component integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 1-5.
- [10] 邓旭阳,索南加乐,刘凯. 采用归一化制动系数的故障分量综合阻抗的母线保护新判据[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 65-71.
DENG Xuyang, SUONAN Jiale, LIU Kai. A new criterion adopting normalized restraint coefficient for bus-bar protection based on fault component integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 65-71.

(编辑 杜秀杰)