

基于零序差流特征的变压器差动保护优化方法

孙仲民¹, 张晓宇¹, 林金娇², 顾乔根¹, 李 鹏², 莫品豪¹, 郑 超¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 当Yd接线变压器的角侧绕组未配置电流互感器时, 差动保护需利用角侧环外电流进行差动电流计算。针对此工况下变压器发生单相故障时差动保护灵敏度降低的问题, 提出一种基于零序差流特征的变压器差动保护优化方法。首先, 采用星侧不减零序分量的方法计算各侧校正电流, 进而得到三相差动电流。其次, 根据单相故障时差动电流的特征, 得出真实零序差流的估计值, 以消除零序分量的影响, 获得校正后的差动电流。随后, 结合校正后的差动电流与比率差动特性判断保护是否动作, 并依据动作相别实现故障选相。最后, 通过仿真与实际波形验证了所提方法的有效性, 该方法在单相故障时能够增大故障相差动电流, 消除零序分量对非故障相的影响, 提高了差动保护的灵敏度与故障选相准确率。

关键词: 变压器; 继电保护; 差动保护; 零序差流; 故障选相

DOI: 10.19585/j.zjdl.202604008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An optimal transformer differential protection method based on zero-sequence differential current characteristics

SUN Zhongmin¹, ZHANG Xiaoyu¹, LIN Jinjiao², GU Qiaogen¹, LI Peng², MO Pinhao¹,
ZHENG Chao¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: When current transformers are not installed on the delta winding of a wye-delta transformer, the differential protection must utilize currents measured outside the delta winding to calculate the differential current. To address the issue of reduced differential protection sensitivity during single-phase faults under this configuration, this paper proposes an optimal transformer differential protection method based on zero-sequence differential current characteristics. Firstly, the corrected currents on each side are calculated using a method that does not subtract the zero-sequence component from the delta side currents, from which the three-phase differential currents are derived. Secondly, based on the characteristics of the differential current during single-phase faults, an estimated value of the zero-sequence differential current is obtained. This is used to eliminate the influence of the zero-sequence component, yielding a corrected differential current. Subsequently, the protection operation decision is made by combining this corrected differential current with the percentage differential characteristic, and fault phase selection is achieved based on the operated phase. Finally, simulations and actual waveform tests verify the effectiveness of the proposed method. The results demonstrate that the method increases the differential current in the faulted phase during single-phase faults while eliminating the impact of the zero-sequence component on the healthy phases, thereby improving both the sensitivity of the differential protection and the accuracy of fault phase selection.

Keywords: transformer; relay protection; differential protection; zero-sequence differential current; fault phase selection

0 引言

变压器作为一种重要的电力设备, 其安全运

行是电力系统安全稳定运行的重要保证^[1-3]。目前, 比率差动保护^[4-5]被广泛用作变压器的主保护, 相关研究主要集中于防止保护误动与拒动方面, 重点关注空载充电时产生的励磁涌流^[6-7]、故障性涌流^[8-9]及CT(电流互感器)饱和^[10]对差动保护的影响^[11-15]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5500-202318115A-1-1-ZN)

当变压器发生外部故障时, 差动保护的灵敏度受过渡电阻影响; 对于含有电力电子设备的系统, 其控制策略亦会改变差动保护性能^[16-17]。变压器内部故障多由匝间故障引起^[18-19]。变压器发生匝间短路时, 差动保护从外部感受到的故障特征微弱, 若此时差动保护的灵敏度不足, 易导致保护不能及时动作^[20-21]。文献[22]提出基于负序分量的故障判别方法, 提高了低频变压器区内故障时纵差保护的速动性, 但该方法只适用于故障电流较大的情况。文献[23]基于相序差动电流和涌流间断偏移特征, 提出适用于换流变压器的匝间保护优化方案, 可在二次谐波制动期间开放差动保护, 但该方案需在变压器绕组侧装设CT, 这限制了其在普通变压器中的应用。文献[24]通过构建与网侧绕组纵向电压幅值成正向线性关系的自适应动作门槛, 并结合两侧电流幅值自动调节制动力, 以提高差动保护的灵敏度, 但该方法仅适用于串联绕组端电压可调的串联变压器。

对于Yd接线变压器, 受成本与结构限制, 除部分高电压等级或特殊结构的变压器外, 角侧通常只在三角形绕组环外安装CT。由于环外无零序电流通路, 角侧CT无法采集零序电流。与角侧不同, 在星侧中性点接地时, 其CT可采集零序分量。尽管零序差动保护在理论上可灵敏地识别接地故障^[25-26], 但在实际应用中, 普通三相一体式变压器中性点外接零序CT性能通常弱于各侧保护CT, 且极性校验困难, 易因极性接错导致误动^[27]。因此, 仅在换流变压器和500 kV及以上自耦变压器中才采用分相CT自产零序构成的零序差动保护, 且该保护在涌流及CT饱和工况下存在误动风险^[28-29]。

当变压器发生单相故障且存在零序回路时, 按现有差动电流计算方法, 星侧校正电流需消除零序分量, 否则各相差动电流中均会存在零序差流分量。然而, 当星侧区内发生单相故障时, 计算校正电流时所减去的零序电流并非真正流过绕组的零序电流分量。这将导致故障相差动电流的有效值减小, 保护灵敏度降低。尤其在经过渡电阻接地或发生轻微匝间故障时, 消除“虚假”的零序分量后的故障相差动电流会大幅减小, 可能未达比率差动的动作门槛, 造成保护拒动。

针对330 kV及以下电压等级的Yd接线三相一体式变压器(通常其角侧无绕组CT, 且未配置由特性较差的中性点零序CT构成的零序差动保护)在星侧单相故障时保护灵敏度不足的问题, 本文提出一种基于零序差流特征的差动保护优化方法。该方法在计算变压器星侧校正电流时不减去零序电流, 通过三相差动电流特征得到真实的零序分量估计值, 在此基础上消除零序分量的影响, 进而得到校正后的差动电流。所提方法无需外接零序CT, 能够增强故障特征, 同时消除零序分量对非故障相的影响, 有效提高差动保护的灵敏度与故障选相的准确性。

1 星侧单相故障特征及差动电流的计算

1.1 单相故障特征

典型的YNd接线变压器星侧发生单相接地故障时, 零序电流路径及零序等效电路如图1所示。图1(a)中标注了流经变压器各侧的零序电流分量(实际电流中还叠加有负载或故障电流等其他分量)。CT1和CT2分别为星侧、角侧的CT。当图1(a)中F1或F2处发生单相接地故障时, 变压器星侧和角侧会形成如图1(b)所示的零序等效电路, 其主要由两侧绕组的漏抗 x_1 、 x_2 和零序励磁电抗 $x_{m(0)}$ 构成。此时, 若变压器星侧流过零序电流, 将在角侧各相绕组中感应产生零序电动势, 进而在角侧绕组中形成零序环流。由于该环流具有三相幅值相等和相位相同的特性, 不会流出环外, 因此CT2采集的电流不含零序分量。

1.2 校正电流

典型的YNd11接线星侧校正电流为:

$$\begin{cases} \dot{I}'_{YA} = \frac{(\dot{I}_{YA} - \dot{I}_{Y0})}{I_{Y2}} \\ \dot{I}'_{YB} = \frac{(\dot{I}_{YB} - \dot{I}_{Y0})}{I_{Y2}} \\ \dot{I}'_{YC} = \frac{(\dot{I}_{YC} - \dot{I}_{Y0})}{I_{Y2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{I}_{YA}$ 、 $\dot{I}_{YB}$ 、 $\dot{I}_{YC}$ 分别为星侧A、B、C相CT1处二次电流相量值; 零序电流 $\dot{I}_{Y0} = (\dot{I}_{YA} + \dot{I}_{YB} + \dot{I}_{YC})/3$; I_{Y2} 为变压器星侧二次额定电流; $\dot{I}'_{YA}$ 、 $\dot{I}'_{YB}$ 、 $\dot{I}'_{YC}$ 为星侧校正电流。

角侧校正电流需要考虑转角关系:

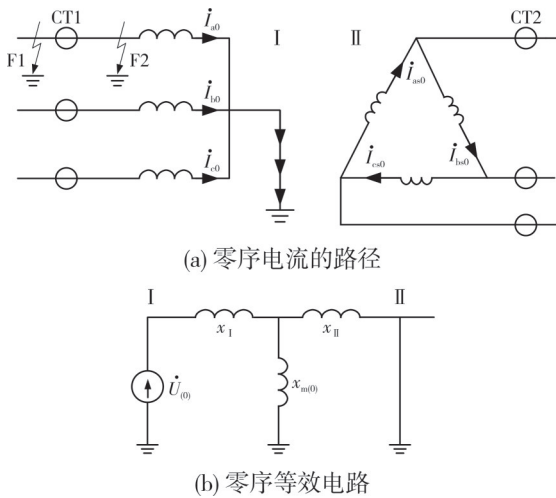


图1 YNd接线变压器的零序电流路径及零序等效电路
Fig.1 Zero-sequence current path and equivalent circuit of YNd connected transformer

$$\begin{cases} \dot{I}'_{\Delta A} = \frac{(\dot{I}_{\Delta A} - \dot{I}_{\Delta C})}{\sqrt{3} I_{\Delta 2}} \\ \dot{I}'_{\Delta B} = \frac{(\dot{I}_{\Delta B} - \dot{I}_{\Delta A})}{\sqrt{3} I_{\Delta 2}} \\ \dot{I}'_{\Delta C} = \frac{(\dot{I}_{\Delta C} - \dot{I}_{\Delta B})}{\sqrt{3} I_{\Delta 2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\dot{I}_{\Delta A}$ 、 $\dot{I}_{\Delta B}$ 、 $\dot{I}_{\Delta C}$ 分别为角侧A、B、C相CT2处二次电流； $I_{\Delta 2}$ 为变压器角侧二次额定电流； $\dot{I}'_{\Delta A}$ 、 $\dot{I}'_{\Delta B}$ 、 $\dot{I}'_{\Delta C}$ 为角侧校正电流。

差动电流 $\dot{I}_{d\varphi}$ 和制动电流 $I_{r\varphi}$ 计算公式为：

$$\begin{cases} \dot{I}_{d\varphi} = (\dot{I}'_{Y\varphi} + \dot{I}'_{\Delta\varphi}) \\ I_{r\varphi} = \frac{|\dot{I}'_{Y\varphi}| + |\dot{I}'_{\Delta\varphi}|}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\dot{I}'_{Y\varphi}$ 和 $\dot{I}'_{\Delta\varphi}$ 分别为星侧、角侧的三相校正电流； φ 为A、B、C相。

1.3 对差动保护的影响

由图1(a)所示，若F1处发生区外单相接地故障，CT1所采集的电流为流经星侧绕组的电流，故含有零序分量；CT2所采集的电流为角侧环外电流，不含零序分量。当变压器星侧按式(1)计算校正电流时，可消除星侧零序分量造成的差动电流，从而使区外故障时的差动电流接近于0，有效防止保护误动。

若F2处发生区内单相接地故障，CT1采集到的A相电流主要为由故障左侧流入的故障点的电

流，而非流经绕组的电流。因此，式(1)的零序电流 $\dot{I}_{Y0}$ 并非真实流经绕组的零序分量。若星侧存在电源，CT1所采集到的A相电流远大于B、C相电流，此时计算的“虚假”零序电流 $\dot{I}_{Y0}$ 约为 $\frac{1}{3}\dot{I}_{YA}$ 。A相减去“虚假”的零序分量后，故障相的差动电流减小，约为 $\frac{2}{3}\dot{I}_{YA}$ ；B、C相减去 $\dot{I}_{Y0}$ 后，均会导致这两个非故障相产生较大的差动电流，约为 $-\frac{1}{3}\dot{I}_{YA}$ 。因此，故障相的差动电流大幅减小，导致保护灵敏度降低；当这个“虚假”的零序分量 $\dot{I}_{Y0}$ 很大时，非故障相可能会误动，使得仅依靠动作相别难以准确判断故障类型。

当发生单相匝间故障时，因三相不平衡形成零序电流通路，非故障相同样会出现零序差流，对差动保护的影响与星侧发生区内单相接地故障类似，此处不再赘述。

2 改进的差动保护及适应工况

2.1 改进的差动保护

当变压器星侧发生区内单相接地故障时，由CT采集到的三相电流计算所得的零序电流并非真正流经变压器中性点的零序分量。为消除此“虚假”的零序分量对差动电流计算带来的不利影响，对星侧电流校正时采用不减零序电流的方法。

$$\begin{cases} \dot{I}'_{YzA} = \frac{\dot{I}_{YA}}{I_{Y2}} \\ \dot{I}'_{YzB} = \frac{\dot{I}_{YB}}{I_{Y2}} \\ \dot{I}'_{YzC} = \frac{\dot{I}_{YC}}{I_{Y2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\dot{I}'_{YzA}$ 、 $\dot{I}'_{YzB}$ 、 $\dot{I}'_{YzC}$ 分别为星侧不减零序时A、B、C相的校正电流。

对角侧电流校正时仍采用式(2)，因此不减零序分量的差动电流 $\dot{I}_{dz\varphi}$ 和制动电流 $I_{rz\varphi}$ 分别为：

$$\begin{cases} \dot{I}_{dz\varphi} = (\dot{I}'_{Yz\varphi} + \dot{I}'_{\Delta\varphi}) \\ I_{rz\varphi} = \frac{|\dot{I}'_{Yz\varphi}| + |\dot{I}'_{\Delta\varphi}|}{2} \end{cases} \quad (5)$$

因为星侧流经绕组的零序电流在非故障相产生了零序差流，所以将不减零序分量的三相校正电流代入式(5)，非故障相也会有差动电流。

将式(5)中计算所得的三相差动电流 $\dot{I}_{dA}$ 、 $\dot{I}_{dB}$ 、 $\dot{I}_{dC}$ 的瞬时值表示为 i_{da} 、 i_{db} 、 i_{dc} , 进一步计算相间差动电流的绝对值 i_{dab} 、 i_{dbc} 、 i_{dca} 为:

$$\begin{cases} i_{dab} = |i_{da} - i_{db}| \\ i_{dbc} = |i_{db} - i_{dc}| \\ i_{dca} = |i_{dc} - i_{da}| \end{cases} \quad (6)$$

设定零序差流判别门槛值为 i_{dth} , 当 $i_{dab} < i_{dth}$ 且持续时间达到 t 时, AB 相间差动电流为零序差流, 令 $n_{ab}=1$, 否则, $n_{ab}=0$; 当 $i_{dbc} < i_{dth}$ 且持续时间达到 t 时, BC 相间差动电流为零序差流, $n_{bc}=1$, 否则, $n_{bc}=0$; 当 $i_{dca} < i_{dth}$ 且持续时间达到 t 时, CA 相间差动电流为零序差流, $n_{ca}=1$, 否则, $n_{ca}=0$ 。

基于上述判断逻辑, 将真实的零序差流估计值 i_{d0} 表示为:

$$\begin{cases} i_{d0} = \frac{i_{da} + i_{db} + i_{dc}}{3}, n_{abc} \geq 2 \\ i_{d0} = \frac{i_{da} + i_{db}}{2}, n_{ab} = 1 \text{ 且 } n_{abc} = 1 \\ i_{d0} = \frac{i_{db} + i_{dc}}{2}, n_{bc} = 1 \text{ 且 } n_{abc} = 1 \\ i_{d0} = \frac{i_{dc} + i_{da}}{2}, n_{ca} = 1 \text{ 且 } n_{abc} = 1 \\ i_{d0} = 0, n_{abc} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $n_{abc} = n_{ab} + n_{bc} + n_{ca}$ 。

当 $n_{abc} \geq 2$ 时, 表明三相差动电流均近似为零序差流, 采用均值计算零序差流估计值, 以减小随机误差的影响; 此类工况通常为变压器星侧发生区外不对称故障且存在零序电流通路的情况。当 $n_{abc} = 1$ 时, 表明有且仅有两相差动电流近似相同, 可将其视作星侧零序分量构成的零序差流; 此类工况通常为变压器星侧发生区内单相故障且存在零序电流通路的情况。

正常工况下, 变压器各侧无零序电流, 由式(5)计算得到的三相差动电流也近似为0。此时, 据此计算的相间差动电流绝对值持续满足判据(即其值小于 i_{dth} 且持续时间达到 t), 零序差流估计值约为0。上述机制保证了从正常工况过渡到故障工况时, 所零序差流估计值具有连续性。

在获得零序差流估计值 i_{d0} 后, 即可用于消除差动电流中的零序分量。当 $n_{abc} > 0$ 时, 得到校正后的三相差动电流 i'_{da} 、 i'_{db} 、 i'_{dc} 表达式为:

$$\begin{cases} i'_{da} = i_{da} - i_{d0} \\ i'_{db} = i_{db} - i_{d0} \\ i'_{dc} = i_{dc} - i_{d0} \end{cases} \quad (8)$$

当 $n_{abc}=0$ 时, 表示无法准确估计零序差流, 将校正后的三相差动电流 i'_{da} 、 i'_{db} 、 i'_{dc} 均置为0, 即:

$$\begin{cases} i'_{da} = 0 \\ i'_{db} = 0 \\ i'_{dc} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可求得校正后的三相差动电流, 并计算出有效值 $I'_{d\varphi}$ 。为提升改进方法的可靠性, 将制动电流 $I'_{r\varphi}$ 取为式(3)中 $I_{r\varphi}$ 和式(5)中 $I_{rz\varphi}$ 的较大值, 从而增强制动特性:

$$I'_{r\varphi} = \max \{ I_{rz\varphi}, I_{r\varphi} \} \quad (10)$$

对非故障相, 通过选取较大的制动电流, 可使差动可靠制动; 对故障相, 其校正后的差动电流与制动电流均增大。由于流经绕组的零序分量远小于故障相电流, 结合式(3)和式(5)可知, 实际差动电流的增量与制动电流的增量之比约为2。该比值大于比率差动特性曲线的比率系数, 从而提高了差动保护的灵敏度。

最后, 将改进方法计算得到的校正后的差动电流 $I'_{d\varphi}$ 与制动电流 $I'_{r\varphi}$, 结合比率差动保护的动作特性曲线, 即可判断保护是否动作。原差动保护和改进后的差动保护计算过程如图2所示。

此外, 校正后的差动电流能够直接、准确地反映故障相别, 因此可根据保护动作相别实现准确的故障选相。

改进的变压器差动保护动作及故障选相逻辑如图3所示。改进的差动保护仍需集成原差动保

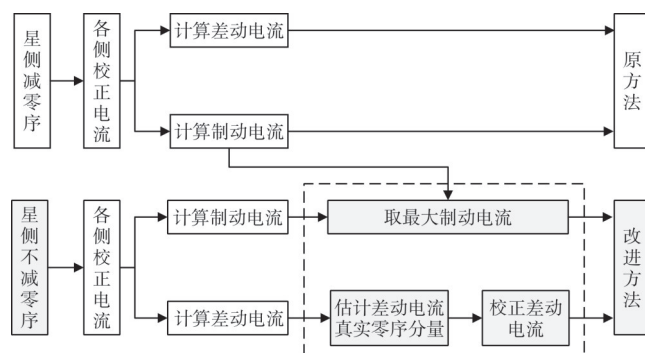


图2 原方法和改进方法计算过程

Fig.2 Calculation process of conventional and improved methods

电流, 且差动电流约为故障A相差动电流的1/2, 相位相反, 即B、C相的差动电流主要由计算的“虚假”零序分量构成。

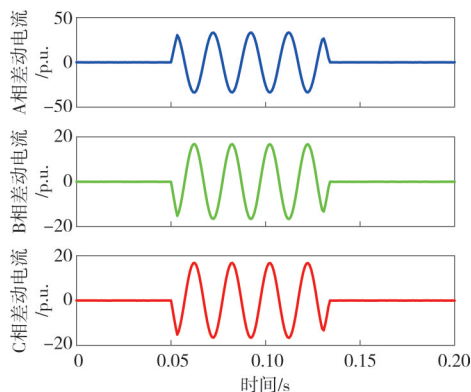


图6 算例1中经方法一计算差动电流

Fig.6 Differential current calculated by Method 1 in Case 1

采用方法二时, 变压器星侧计算校正电流时不减去零序电流, 得到三相差动电流波形与估计的零序差流波形如图7所示。非故障B、C相存在真实零序电流构成的差动电流, 幅值相对较小, 由B相差动电流和C相差动电流可估计真实零序差流。

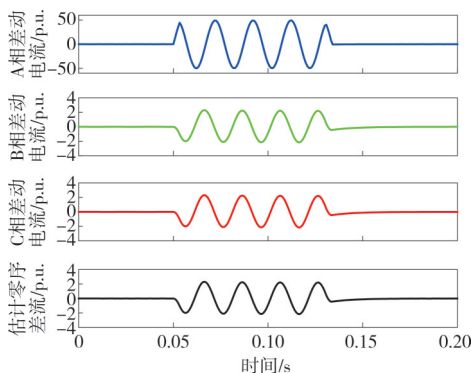


图7 算例1中经方法二计算差动电流与估计零序差流

Fig.7 Differential current and estimated zero-sequence differential current calculated by Method 2 in Case 1

采用方法二进一步消除差动电流中的零序分量, 可得到三相校正差动电流波形如图8所示。由图8可知, 消除真实零序分量后, B、C相差动电流已接近0, A相差动电流相比于图6中方法一计算的A相差动电流, 其幅值有较大增加。

采用方法一和方法二计算的差动电流有效值及差动保护动作门槛值对比如图9所示。动作门槛

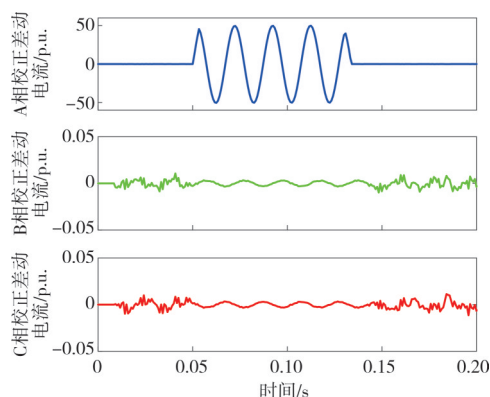


图8 算例1中经方法二计算校正差动电流波形

Fig.8 Corrected differential current calculated by Method 2 in Case 1

值由制动电流结合差动保护动作特性曲线计算得到。由图9可知, 采用方法一时, 计算得到的三相差动电流值均高于动作门槛值; 采用方法二时, 仅有故障相A相动作, 选相准确。此外, 方法二中A相差动电流有效值高于动作门槛值的程度大于方法一, 保护灵敏度更高。

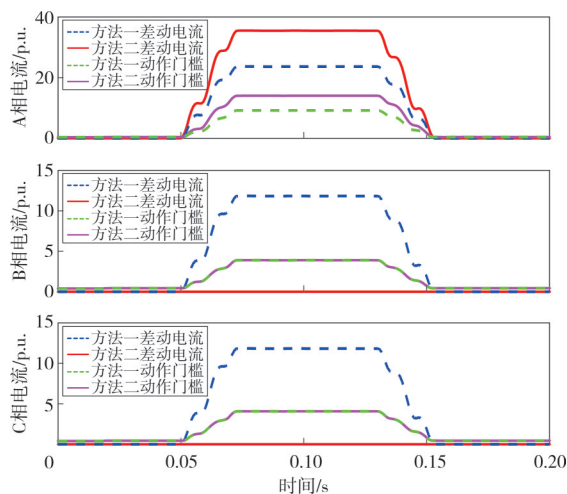


图9 算例1差动电流及动作门槛对比

Fig.9 Comparison of differential currents and operating thresholds in Case 1

3.3 算例2: 经过渡电阻接地故障

模拟区内K1处A相经过渡电阻接地故障, 接地电阻为300 Ω , 采用方法一和方法二时计算所得的差动电流有效值及动作门槛值对比如图10所示。由图10可知, 采用方法一时, 三相动作门槛始终高于差动电流有效值, 保护不动作。采用方法二时, 故障期间A相差动电流超过动作门槛动作,

B、C相门槛远高于差动电流有效值,可靠不动作。发生高阻接地故障时,故障特性轻微,改进方法有效地提升故障相的保护动作灵敏度。

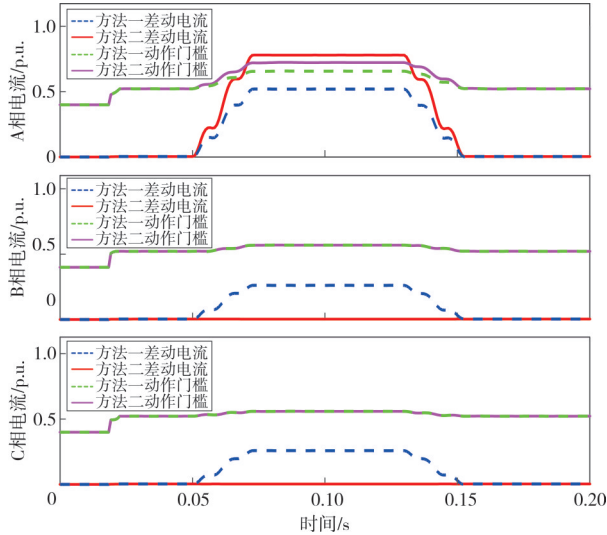


图10 算例2中方法一和方法二差动电流及动作门槛对比

Fig.10 Comparison of differential currents and operating thresholds between Method 1 and Method 2 in Case 2

3.4 算例3: 匝间故障

变压器仿真模型的高压侧绕组可设置2个故障引出点,并通过设置故障点间的绕组电压占全部绕组电压的百分比来模拟不同程度的匝间短路故障。模拟变压器高压侧K2处发生A相2%匝间短路,采用方法二计算得到的差动电流与估计零序差流如图11所示,此时B、C相差动电流为真实零序分量构成的差动电流,二者相似度较高。经校正,消除差动电流中的零序分量,仅A相存在差动电流,如图12所示。

算例3差动电流及动作门槛对比如图13所示。方法一计算三相差动电流有效值均低于差动动作门槛值,保护不动作,其中A相差动电流最大值为0.62 p.u.。采用方法二时,故障时A相差动电流有效值约为0.93 p.u.,大于动作门槛,保护可靠动作。B、C相门槛远高于差动电流有效值,可靠不动作。分析表明,发生轻微匝间故障时,故障特征不明显,此时改进方法具有更高的灵敏度。

3.5 算例4: 区外故障

模拟变压器高压侧区外K3和中压侧区外K4处各类故障,验证所提方法的可靠性,故障类型

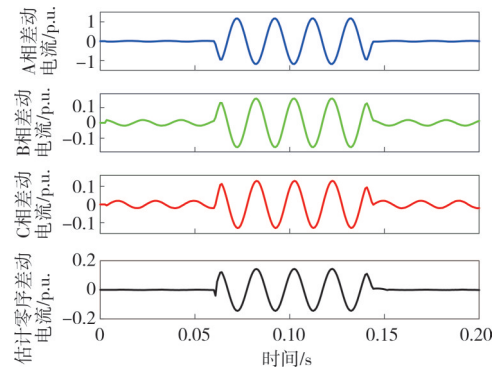


图11 算例3中方法二计算差动电流与估计零序差流

Fig.11 Differential current and estimated zero-sequence differential current calculated by Method 2 in Case 3

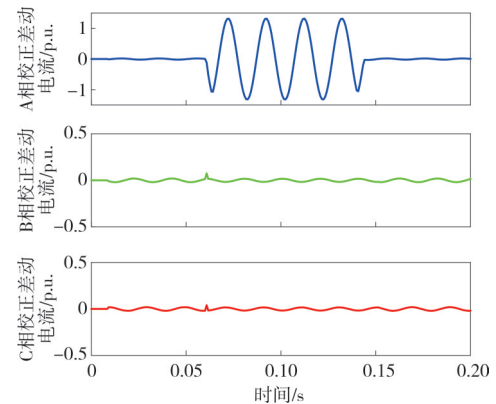


图12 算例3中方法二计算校正差动电流与估计零序差动电流

Fig.12 Corrected differential current and estimated zero-sequence differential current calculated by Method 2 in Case 3

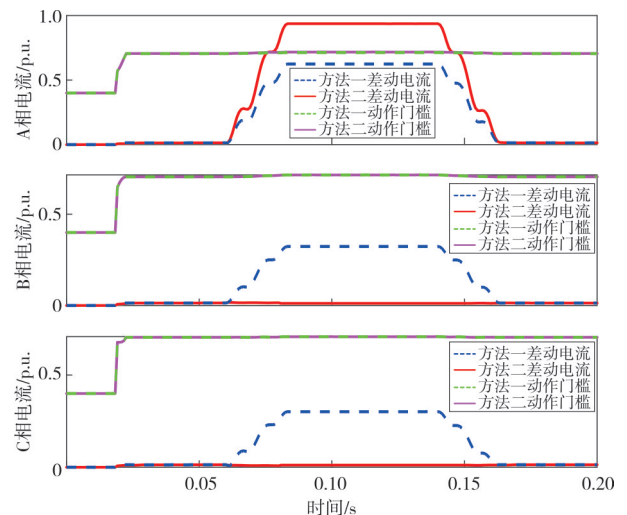


图13 算例3差动电流及动作门槛对比

Fig.13 Comparison of differential currents and operating thresholds in Case 3

及方法二的动作结果见表 1。

表 1 故障类型及方法二的动作结果

Table 1 Fault types and operation results of Method 2

故障类型	K3 处动作结果	K4 处动作结果
单相接地	不动作	不动作
相间接地	不动作	不动作
相间短路	不动作	不动作
三相短路	不动作	不动作

当星侧发生区外单相接地故障和两相接地故障时, 星侧 CT 采集的电流为经过绕组的电流, 此电流含有零序分量, 因此三相差动电流主要由零序分量造成, 经方法二校正后三相差动电流近似为 0。以表 1 中 K3 处 C 相接地故障为例, 其差动电流和动作门槛如图 14 所示, 方法二的三相制动均远大于差动电流有效值, 保护不动作。

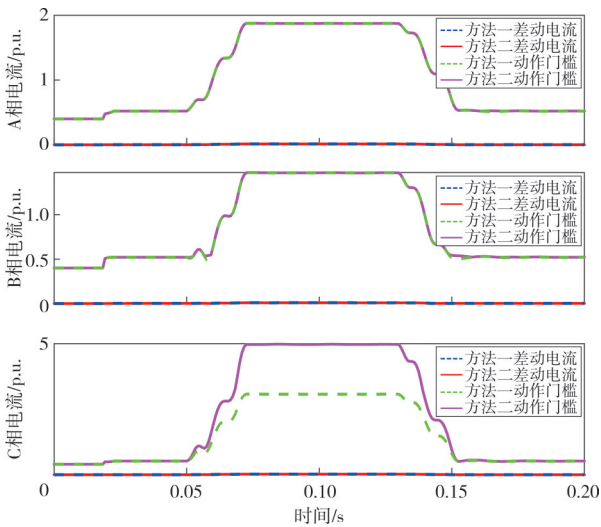


图 14 K3 处 C 相接地故障时差动电流及动作门槛

Fig.14 Differential current and operating threshold during phase-C ground fault at K3

当星侧发生区外两相和三相故障时, 变压器各侧电流均不含零序分量, 因此三相差动电流接近为 0, 方法一和方法二的计算结果一致。以表 1 中 AB 相间故障为例, 其差动电流和动作门槛如图 15 所示, 方法一和方法二计算结果一致, 其三相制动均远大于差动电流有效值, 保护不动作。

4 实际波形验证

某 220 kV 变电站主变发生 C 相匝间短路故障时的各侧电流波形如图 16 所示。变压器联结方式

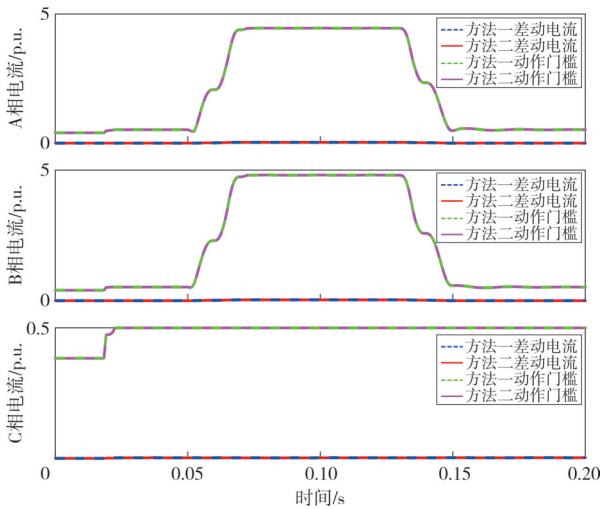


图 15 K3 处 A、B 相故障时差动电流及动作门槛

Fig.15 Differential current and operating threshold during phase A-B fault at K3

为 YNyn0d11, 额定容量为 70 MVA, 高、中和低压侧额定电压分别为 220 kV、35 kV 和 10 kV。差动启动值为 0.5 p.u., 其他参数与 3.1 节一致。同样采用方法一和方法二进行比对分析。

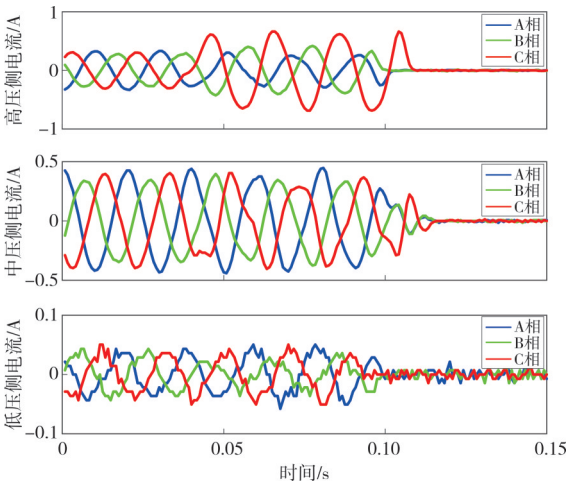


图 16 变压器匝间 C 相故障时各侧电流波形

Fig.16 Current waveforms on each side during transformer phase-C inter-turn fault

方法一和方法二的差动电流及动作门槛比较结果如图 17 所示。由图 17 可知, 采用方法一时三相差动动作门槛始终略高于差动电流有效值, 保护拒动。采用方法二时, 故障期间 C 相差动电流高于动作门槛, 差动保护 C 相可靠动作, 而 A、B 相门槛则远高于差动电流有效值, 符合实际故障特征, 现场实际故障分析结果进一步验证了所提

方法的有效性。

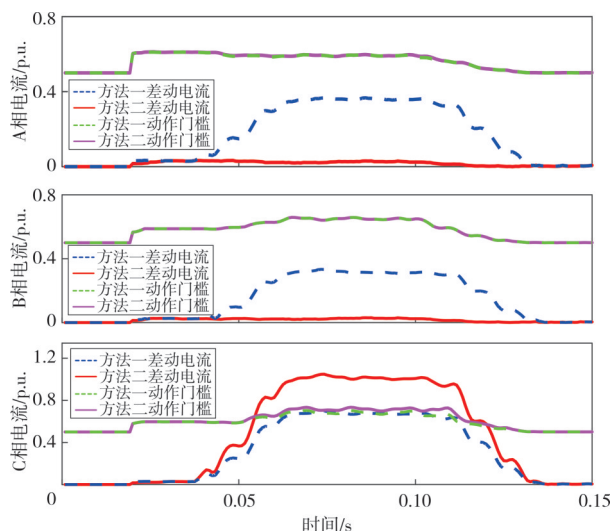


图17 C相匝间短路时方法一和方法二差动电流及动作门槛对比

Fig.17 Comparison of differential currents and operating thresholds between Method 1 and Method 2 during phase-C inter-turn short-circuit

5 结语

Yd接线变压器星侧发生单相故障时,原差动保护采用星侧减去零序分量的方法校正差动电流,这会削弱故障相差动电流,同时增大非故障相差动电流,从而降低保护灵敏度。为此,提出一种基于零序差流特征的变压器差动保护优化方法。

本文方法采用变压器星侧不减零序分量的校正电流,重新计算差动电流和制动电流。通过三相差动电流计算真实零序分量估计值,并在此基础上消除零序分量影响,得到校正后的差动电流。该方法能增大故障相差动电流,同时消除零序分量对非故障相的干扰,从而提升差动保护的灵敏度与故障选相准确性。此外,在区外各类故障下,所提方法制动特性更强,能可靠防止误动。

需要指出的是,当变压器星侧发生两相接地故障时,由于纯零序分量造成的差动电流仅有一相,导致本文方法难以准确获得零序差流估计值。因此,在此类工况下如何进一步提高差动保护灵敏度,仍有待后续研究。

参考文献

[1] 郑涛,胡鑫.特高压换流变故障性涌流产生机理及其对差

动保护的影响[J].电力自动化设备,2019,39(5):109-115.

ZHENG Tao, HU Xin. Fault inrush current mechanism of UHV converter transformer and its impacts on differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 109-115.

[2] 卢应强,胡忠忠,尚虎军,等.变压器绕组典型缺陷下漏磁特性及辨识方法研究[J].浙江电力,2025,44(2):110-123.

LU Yingqiang, HU Zhongzhong, SHANG Hujun, et al. Research on magnetic flux leakage characteristics and identification methods under typical transformer winding defects[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(2): 110-123.

[3] 宗琳,周晓华,罗文广,等.蛭螂算法优化概率神经网络的变压器故障诊断[J].智慧电力,2024,52(5):98-104.

ZONG Lin, ZHOU Xiaohua, LUO Wenguang, et al. Transformer fault diagnosis based on probabilistic neural network optimized by dung beetle optimizer [J]. Smart Power, 2024, 52(5): 98-104.

[4] 孙仲民,顾乔根,张晓宇,等.分接开关可控移相变压器保护配置及故障特征分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(14):121-131.

SUN Zhongmin, GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, et al. Protection configuration and fault characteristics analysis of a tap-changer controllable phase-shifting transformer [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 121-131.

[5] 陈松林,李海英,乔勇,等.RCS—978变压器成套保护装置[J].电力系统自动化,2000,24(22):52-56.

CHEN Songlin, LI Haiying, QIAO Yong, et al. Rcs-978 digital transformer protection set [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 52-56.

[6] 韩霄,陈浩天,周佳,等.变压器分闸对铁心剩磁的影响研究[J].浙江电力,2025,44(2):103-109.

HAN Xiao, CHEN Haotian, ZHOU Jia, et al. Research on the impact of transformer switching-off on core residual magnetism [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(2): 103-109.

[7] 翁汉琨,梅瀚予,郭伟达,等.基于差流符号序列特征的变压器励磁涌流识别判据[J].电力自动化设备,2022,42(6):206-211.

WENG Hanli, MEI Hanyu, GUO Yida, et al. Identification criterion of transformer magnetizing inrush current based on symbol sequence characteristic of differential current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 206-211.

[8] 郑涛,国兴超,胡鑫,等.逆变侧换流变压器故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J].电力自动化设备,2019,39(9):39-45.

- ZHENG Tao, GUO Xingchao, HU Xin, et al. Fault inrush current generation mechanism of inverter-side converter transformer and its influence on differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 39-45.
- [9] 郑涛,何瑞,杨鑫慧,等.故障性涌流影响下换流变差动保护的可靠性风险评估[J].电网技术,2021,45(11):4490-4497.
- ZHENG Tao, HE Rui, YANG Xinhui, et al. Reliability risk assessment of differential protection of converter transformer under influence of fault-induced inrush current[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4490-4497.
- [10] 翁汉琰,贾永波,李振兴,等.二维空间重构电流特征轨迹的变压器差动保护判据[J].电力系统自动化,2020,44(9):144-150.
- WENG Hanli, JIA Yongbo, LI Zhenxing, et al. Transformer differential protection criterion based on reconstructed trajectory of current characteristics in two-dimensional space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 144-150.
- [11] 冯兴隆,孔锋峰,霍凯龙,等.基于5G无线通信的配电网电流差动保护系统设计[J].电测与仪表,2025,62(1):116-123.
- FENG Xinglong, KONG Fengfeng, HUO Kailong, et al. Design of current differential protection system for distribution network based on 5G wireless communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(1): 116-123.
- [12] 史艳刚,朱海勇,陆立文,等.低频输电系统控制对差动保护影响及优化策略[J].电力工程技术,2025,44(3):160-169.
- SHI Yangang, ZHU Haiyong, LU Liwen, et al. Influence of low-frequency transmission system control on differential protection and optimization strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 160-169.
- [13] 郝韩兵,王同文,朱思杰,等.基于5G和粒子群算法的配电网差动保护[J].电测与仪表,2025,62(7):148-155.
- HAO Hanbing, WANG Tongwen, ZHU Sijie, et al. Differential protection of distribution network based on 5G and particle swarm algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 148-155.
- [14] 张心怡,盖午阳,孙巧玉,等.基于电流变异特性的直流配电系统单极接地差动保护方法[J].智慧电力,2025,53(6):93-100.
- ZHANG Xinyi, GAI Wuyang, SUN Qiaoyu, et al. Single-pole grounding differential protection method for DC distribution systems based on current variation characteristics[J]. Smart Power, 2025, 53(6): 93-100.
- [15] 许瑞,於岳祥,李骁,等.基于5G的配电网线路纵联电流差动保护零序补偿方法[J].电测与仪表,2025,62(4):105-112.
- XU Rui, YU Yuexiang, LI Xiao, et al. Zero-sequence compensation method of line longitudinal current differential protection based on 5G distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(4): 105-112.
- [16] 陈晓龙,朱雨葭,张浩,等.光伏电站主变压器比率差动保护对单相接地短路故障的适应性分析[J].电力自动化设备,2023,43(10):217-224.
- CHEN Xiaolong, ZHU Yujia, ZHANG Hao, et al. Adaptability analysis of photovoltaic power station main transformer ratio differential protection to single-phase grounding short circuit fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 217-224.
- [17] 吴建云,国兴超,罗美玲,等.逆变侧换流变压器网侧接地故障对差动保护影响分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(17):170-178.
- WU Jianyun, GUO Xingchao, LUO Meiling, et al. Analysis of influence of grounding fault of the network side of an inverter-side converter transformer on differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 170-178.
- [18] 郑玉平,龚心怡,潘书燕,等.变压器匝间短路故障工况下的漏磁特性分析[J].电力系统自动化,2022,46(15):121-127.
- ZHENG Yuping, GONG Xinyi, PAN Shuyan, et al. Analysis on leakage flux characteristics of turn-to-turn short-circuit fault for power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 121-127.
- [19] 中国电力企业联合会.2017年全国电力可靠性年度报告[EB/OL].(2018-06-07)[2025-06-11].<https://cec.org.cn/detail/index.html> 3-258004.
- [20] 郑玉平,刘小宝,俞波,等.基于有功损耗的自适应变压器匝间保护[J].电力系统自动化,2013,37(10):104-107.
- ZHENG Yuping, LIU Xiaobao, YU Bo, et al. A method of adaptive transformer turn-turn fault protection based on power loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 104-107.
- [21] 郑玉平,郝治国,薛众鑫,等.大型电力变压器安全运行与主动保护技术探索[J].电力系统自动化,2023,47(20):1-12.
- ZHENG Yuping, HAO Zhiguo, XUE Zhongxin, et al. Exploration of safe operation and active protection technology for large-capacity power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 1-12.
- [22] 顾乔根,张晓宇,吕航,等.基于故障负序分量的低频变压器快速差动保护[J].电力系统自动化,2023,47(7):184-192.
- GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LYU Hang, et al. Fast dif-

- ferential protection of low-frequency transformer based on fault negative sequence component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 184-192.
- [23] 杜丁香, 杨国生, 曹虹, 等. 基于相序差动电流特征差异的换流变压器匝间保护优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6576-6589.
- DU Dingxiang, YANG Guosheng, CAO Hong, et al. Research on the optimization of inter-turn protection of converter transformers based on the difference of phase sequence differential current characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6576-6589.
- [24] 曹虹, 王兴国, 周泽昕, 等. UPFC串联变压器匝间保护新原理研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1568-1575.
- CAO Hong, WANG Xingguo, ZHOU Zexin, et al. A novel protection principle for turn-to-turn fault of UPFC series transformer [J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1568-1575.
- [25] ZHENG T, YANG X H, GUO X C, et al. Zero-sequence differential current protection scheme for converter transformer based on waveform correlation analysis [J]. Energies, 2020, 13(7): 1814.
- [26] 翁汉琰, 王胜, 饶丹青, 等. 后续换相失败引发的换流变零序差动保护误动场景分析及策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 64-70.
- WENG Hanli, WANG Sheng, RAO Danqing, et al. Analysis of mal-operation scenarios of zero-sequence differential protection of converter transformer caused by subsequent commutation failure and corresponding strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 64-70.
- [27] 游力, 熊平, 李震宇, 等. 500 kV 变压器零序差动保护极性校验方法研究及现场试验[J]. 湖北电力, 2020, 44(2): 67-73.
- YOU Li, XIONG Ping, LI Zhenyu, et al. Research and field test of zero sequence differential protection polarity checking method for 500 kV transformer [J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(2): 67-73.
- [28] 丁苏阳, 林湘宁, 翁汉琰, 等. 换流变零差保护在故障切除恢复性涌流期间的误动风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊1): 12-20.
- DING Suyang, LIN Xiangning, WENG Hanli, et al. Mal-operation risk analysis on zero-sequence differential protection of converter substation during existence of recovery inrush due to fault removal [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 12-20.
- [29] 翁汉琰, 李昊威, 万毅, 等. 特殊工况下换流变零序差动保护误动机理分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 56-64.
- WENG Hanli, LI Haowei, WAN Yi, et al. Mechanism and countermeasures of mal-operation of converter transformer zero-sequence differential protection under special conditions [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 56-64.

收稿日期: 2025-07-14; 修回日期: 2025-08-18

作者简介:

孙仲民(1989), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护与智能运维方面的研究工作。

(本文编辑: 张瑞敏)