

## 二维空间重构电流特征轨迹的变压器差动保护判据

翁汉琨<sup>1</sup>, 贾永波<sup>1</sup>, 李振兴<sup>1</sup>, 黄景光<sup>1</sup>, 林湘宁<sup>2</sup>, 刘雷<sup>3</sup>

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北省宜昌市 443002;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074;

3. 国网湖北省电力有限公司检修公司鄂中运维分部, 湖北省武汉市 430050)

**摘要:** 在故障电流的影响下, 变压器差动保护两侧电流互感器(TA)易发生饱和, 使传变的电流波形发生畸变, 严重影响变压器差动保护的正确动作。针对TA饱和造成的变压器差动保护误动或拒动的问题, 对不同故障类型下变压器两侧电流波形相位关系特性进行对比分析, 提出将两侧电流进行二维空间重构, 应用重构后的特征轨迹构造变压器差动保护新判据, 以识别伴随TA饱和的变压器各类故障。通过仿真和动模试验, 验证新判据有较高的可靠性和灵敏性, 并且具备较强抗TA饱和的能力。

**关键词:** 变压器差动保护; 二维空间重构; 电流特征轨迹; 相位特征; 电流互感器饱和

### 0 引言

近年来中国电网迅速发展, 逐渐形成高密度的复杂电网, 这对电网运行的安全性有了更高的要求<sup>[1]</sup>。变压器作为电力系统电能传输的重要设备, 其保护动作正确性尤为重要。差动保护因其原理简单, 仅使用电流量区分故障类型而作为变压器的主保护广泛运用于实际现场。对于励磁涌流的识别及其对差动保护的影响, 已经有许多专家学者展开研究, 但是差动保护仍然面临着电流互感器(TA)饱和带来的异常动作风险。变压器差动保护能否正确动作取决于两侧TA能否正确传输电流信息, 当一侧TA饱和时, 所传变的误差电流信息会引起差动保护异常动作<sup>[2-5]</sup>。

目前, 差动保护普遍使用比率制动特性来应对TA饱和的影响<sup>[6-8]</sup>, 但这种方法存在着一些不足。例如制动系数整定得过高, 会使保护在区内故障时的灵敏度降低; 但若系数过低, 又会造成区外故障TA饱和时保护误动。此外, 国内外许多专家学者还提出了时差法<sup>[9]</sup>、谐波比法<sup>[10]</sup>、小波法<sup>[11-12]</sup>、形态学法<sup>[13-14]</sup>、虚拟制动电流法<sup>[15]</sup>、相对磁链积累法<sup>[16]</sup>等方法识别TA饱和。这些方法虽然能够识别TA饱和状态协助故障类型判别, 但是仍然存在以下问

题。对于时差法而言, 难以实现故障时刻与差流出现时刻的精确定位因而可靠性无法保障; 谐波比法可能会因为出现大量谐波分量而延时动作; 小波法可检测TA二次电流小波极大值的差异性, 但是在某些临界处或者过零点会出现较大偏差; 形态学法提供的判据需要大量计算时间, 可能会延误保护动作; 虚拟制动电流法需要结合其他判据。

本文通过对变压器发生区内、区外故障时, 在TA正常传变以及饱和的情况下, 两侧电流波形特征差异进行对比分析, 将两侧电流数据在二维坐标系中进行重构, 提出将重构后的特征轨迹作为判别变压器不同故障工况的依据, 构造简单易行且仅采用电流量的新判据来有效解决TA饱和引起的保护误动或拒动问题, 并通过仿真和实验对所提判据的有效性进行验证。

### 1 变压器故障电流特征分析

理想情况下, 变压器发生区内故障时两侧电流相位差为0, 而区外故障时存在着较大的相位差<sup>[5, 17]</sup>。以双电源供电的双绕组变压器系统模型为例进行分析(模型图见附录A图A1), 母线指向变压器的方向为正方向。提取一次侧和二次侧TA测量的电流序列 $i_1$ 和 $i_2$ , 对两电流序列进行时域特性比较。

不同故障类型下变压器两侧电流(标幺值)随时间变化波形如图1所示, 故障均在 $t=0.4$  s时发生。由图1(a)可知, 在变压器正常运行时, 两侧电流大

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-12-12。

上网日期: 2020-03-04。

国家自然科学基金资助项目(51677108)。

小相等方向相反;在发生区内故障后,两侧电流幅值增大,且两波形的方向由反相变为了基本同相;如图1(b)所示,在发生区外故障时,虽然两侧电流幅值增大,但其波形依旧反相。图1(c)和(d)中,虽然受到TA饱和的影响,饱和侧电流波形发生了畸变,但两侧电流的相位特征仍然与TA正常传变时类似,即区内故障时两侧电流相位基本同相,而区外故障时两侧电流相位基本反相。

由此可知,变压器两侧电流波形序列的相位关

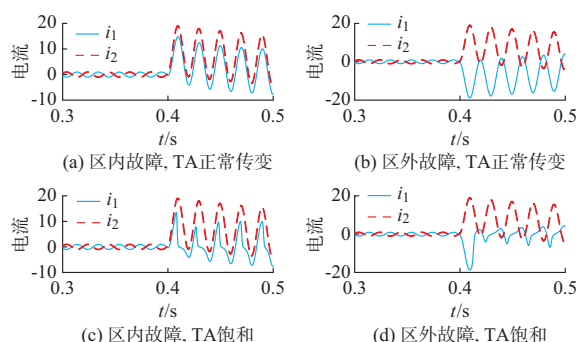


图1 不同故障时变压器电流波形  
Fig. 1 Current waveforms of transformer with different faults

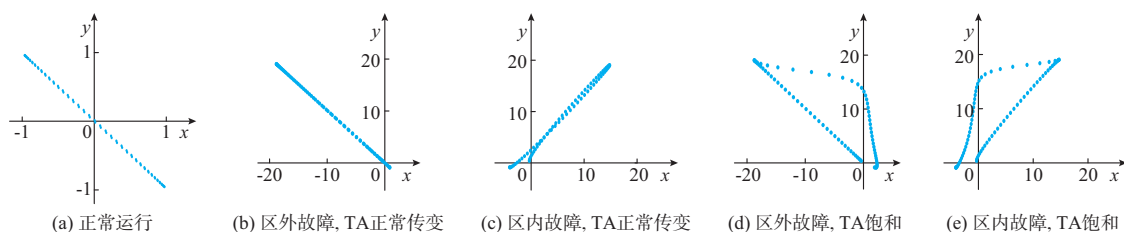


图2 不同情况下电流重构后的轨迹  
Fig. 2 Reconstructed current trajectories in different circumstances

由图2(a)和(b)可知,变压器正常运行或发生区外故障且TA正常传变时,由于两侧电流基本反相,使得重构至坐标系中的特征轨迹基本仅出现在第二、四象限,而第一、三象限所含点数较少;而发生区内故障且TA正常传变时,两侧电流基本同相,由图2(c)可以看出,重构特征轨迹中绝大部分点出现在第一、三象限内,即大部分轨迹点落在第二、四象限之外;而区外故障伴随一侧TA饱和时,如图2(d)所示,饱和TA侧电流在波形饱和区幅值基本不变,重构后少量的特征点落入第一象限,但在一个周期内其偏移的特征点占所有点的比例较低,仍能维持大部分点处于第二、四象限的特性。区内故障伴随一侧TA饱和的情况与此类似,饱和TA一侧的电流畸变,会引起部分点落入第二象限,但一个周期内大部分的特征点仍然位于第一、三象限,如图2(e)

系特征受TA状态的影响较小,区内故障时两侧电流波形序列基本同相,可以将两者视为正相关;而区外故障时两侧电流反相,则两者可视为负相关。因此,可将一侧电流某个时刻的采样值作为二维空间横坐标,对应同时刻另一侧电流采样值作为纵坐标,那么,两侧电流相关性可用该二维空间中重构的特征轨迹来表征。即区内故障两侧电流为正相关时,两者重构特征轨迹应落于二维空间的第一、三象限;而区外故障两侧电流为负相关时,两者重构的特征轨迹应基本落于二维空间的第二、四象限。考虑采用特征轨迹位于不同象限的差异来构建新的变压器差动保护判据。

## 2 电流波形在二维空间中重构

### 2.1 双侧电源供电系统情况分析

以4 kHz的采样频率(一个周期80个采样点)提取变压器一个周期内两侧TA测量的电流序列 $i_1$ 和 $i_2$ , $i_1$ 和 $i_2$ 分别对应横坐标( $x$ 轴)和纵坐标( $y$ 轴)并在二维坐标系中形成重构后的特征轨迹,不同情况下重构后的轨迹如图2所示。

所示。

### 2.2 单侧电源供电系统情况分析

变压器运行于单侧电源供电系统时,正常运行或区外故障时两侧均有电流,重构轨迹与双侧电源系统相似,轨迹点也基本出现在二维坐标系第二、四象限区域内;而区内故障时,负荷侧电流为0,电源侧有较大的电流,此时仍然能在二维空间内构成轨迹,但轨迹点基本会落在坐标轴上,因此仍可计为落在第二、四象限之外。

综合考虑上述2种情况,可先计算出一个周期内两侧电流重构后的特征轨迹点落在二维空间第二、四象限区域内的百分比,并取其补集,即表示一个周期内轨迹点落入一、三象限和坐标轴上的百分比,以此作为识别故障类型的依据。

### 3 二维空间重构电流轨迹的保护判据

#### 3.1 判据阈值的选取及动作流程

根据前面分析,设定 $K$ 为重构后的特征轨迹点出现在二维空间坐标系第一、三象限和坐标轴上的点占时间窗内所有点的百分比。即

$$K = \left(1 - \frac{n_{24}}{N}\right) \times 100\%$$

式中: $n_{24}$ 为重构特征轨迹点在第二、四象限内的个数; $N$ 为时间窗内重构特征轨迹点总数。

实时提取变压器两侧TA的二次电流序列 $i_1$ 和 $i_2$ ,在二维空间重构特征轨迹,以一个周期(20 ms)作为时间窗,计算时间窗内的 $K$ 值。时间窗伴随实时重构的特征轨迹向后移动,形成 $K$ 值计算序列,并用来判断故障的类型。

由上文可知,在不考虑损耗的情况下,变压器正常运行或发生区外故障时,两侧的电流波形反相,重构后的特征轨迹整体位于二维空间的第二、四象限,计算所得的 $K$ 值基本接近于0。发生区内故障时,对于双侧电源供电系统,变压器两侧电流波形基本同相,重构后的特征轨迹基本位于二维空间的第一、三象限,对于单侧电源供电系统,变压器电源侧有电流,而负荷侧无电流,重构后的特征轨迹基本位于坐标轴上,2种情况下计算的 $n_{24}$ 均接近0,则 $K$ 的计算值均接近于100%。当区外故障TA饱和严重时,考虑饱和TA侧的电流在一个周期内一半的点取值接近0,则反应到重构后的特征轨迹中,有接近一半的点集中在纵轴上或偏移至第一象限,此时, $K$ 接近50%。不妨以此为动作阈值,即 $K_{\text{set}} = 50\%$ ,当 $K > K_{\text{set}}$ 时,判定为区内故障,保护动作;当 $K < K_{\text{set}}$ 时,判定为区外故障,保护闭锁。

另外,对于变压器空投的情况,主要是解决涌流识别的问题。变压器空载合闸是已知操作,因此在空投时可以采用涌流识别方法<sup>[18-20]</sup>来防止保护误动。本文主要解决运行中变压器因TA饱和造成的差动保护误动或拒动这一问题,在现场应用时,可设置控制字,先判断是否为空载合闸操作,若是,则采用涌流识别判据,若为运行中变压器,则采用本文所提判据进行故障判别。

据此,可构造保护判据的具体流程,详见附录A图A2。

#### 3.2 与现有保护方案的对比

相比于传统的变压器差动保护判据以及现有的保护方案,新判据的优势如下。

1)相比于常用的电流差动保护,本文采用的方

法本质上为相位差动保护,无须使用差流识别故障,能够避免区外故障TA饱和产生的虚假差流导致保护误动的问题,并且能够避免因躲避不平衡电流和最大负荷电流的影响而降低保护灵敏度的问题。相比于传统的相位比较式差动保护,本文将两侧电流的相位差转化为相位的相关性,并将相关性体现在二维坐标系中。因为只需考虑数据窗内重构轨迹点出现在坐标系中的区域,并严格根据判据整定值进行判别,因此能够解决相位比较式差动保护比相动作速度慢的问题。

2)现有的差动保护通常采用谐波制动法来防止保护误动,但是在区内故障TA饱和的情况下,谐波制动会导致保护出现拒动的问题。本文判据依据两侧电流的相位特性构造,相比之下,受谐波的影响较小,不会出现保护拒动的问题。

3)传统带制动特性的差动保护在区外故障TA饱和时可能会出现保护误动的问题,但TA饱和对相位特征影响较小,因此本文判据能够很好地识别该类故障,下文算例4中对比分析了这2种判据。

4)本文判据还具有很强的抗异常数据能力。数据窗内丢失一个采样点或者产生一个虚假脉冲,在最极端的情况下只会导致判据 $K$ 值出现微小的上升或者下降,这对保护动作性能的影响微乎其微。相比于电流差动保护,异常数据则会产生虚假差流导致保护误动,同时一些利用波形相似的保护判据也会因为波形中出现异常数据而使动作性能降低。由于噪声干扰对波形相位特性的影响较小,因此新判据还具有抗噪声干扰的能力。

5)新判据简单易行,仅采用电流量构造判据,能够有效解决TA饱和引起的保护误动或拒动问题。

### 4 仿真和动模验证

#### 4.1 仿真验证

基于PSCAD/EMTDC平台搭建的模型及具体参数见附录A图A1。完成变压器区内、区外故障下TA正常传变与饱和时的仿真。仿真结果以A相电流(标么值)为例。

1)算例1:变压器区内故障,TA正常传变

$t=0.4$  s时,变压器高压侧发生单相接地故障,TA正常传变。在故障发生前,即正常运行时,两侧电流波形反相, $K$ 值为0。故障发生后,两侧电流幅值增大,波形由反相变为基本同相,计算得到的 $K$ 值在 $t=0.411$  s时(故障发生后约半个周期)超过整定值(50%),达到保护动作条件,保护能正确动作。该



算例下两侧电流波形和判据 $K$ 值的计算序列见附录B图B1。

### 2)算例2:变压器区内故障,伴随TA饱和

如图3(a)所示,在 $t=0.4$  s时变压器高压侧发生单相接地故障且高压侧TA发生饱和。故障发生后,受到TA饱和的影响,高压侧TA传变的电流波形发生了畸变,但两侧电流波形总体上仍然保持同相。图3(b)中,虽然判据 $K$ 值较区内故障TA正常传变时降低,但仍然在 $t=0.411$  s时(故障发生后约半个周期)超过动作整定值50%,能够使保护正确动作。随后,因高压侧TA饱和导致电流波形畸变较为严重,使 $K$ 值有所下降,但保护已经在故障发生后的11 ms动作,且 $K$ 值仍然处于整定值(50%)以上,不会影响保护的動作性能。

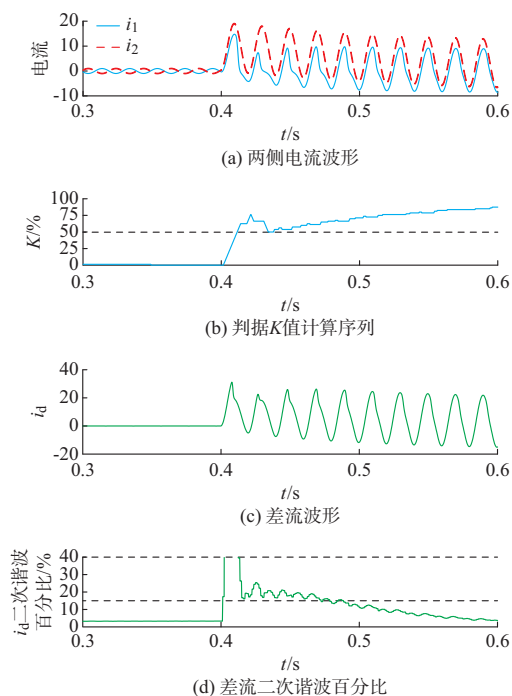


图3 算例2中电流波形及判据对比  
Fig. 3 Current waveforms and criteria comparison in case 2

传统差动保护常使用二次谐波制动法来防止保护误动。图3(c)和(d)为本算例中变压器两侧的差流 $i_d$ 以及差流二次谐波百分比波形。故障侧电流增大导致TA饱和,使得TA测量的电流中含有大量的二次谐波分量,差流中二次谐波百分比激增,直到 $t=0.472$  s时(故障后约4个周期)才降低到制动阈值(15%)以下,造成了保护延时开放。相比于二次谐波制动法,采用本文所提新方案能够解决此类区内故障TA饱和情况下保护延时动作或拒动的问题。

### 3)算例3:变压器区外故障,TA正常传变

在 $t=0.4$  s时发生区外故障,TA正常传变,故障发生前后变压器两侧的电流波形均基本反相,计算得到判据 $K$ 值一直接近于0,远小于动作阈值,因此,保护可靠闭锁。该算例下电流波形及判据 $K$ 值的计算序列见附录B图B2。

### 4)算例4:变压器区外故障,伴随TA饱和

$t=0.4$  s时变压器发生区外故障且高压侧TA发生饱和,两侧电流的波形和判据 $K$ 值如图4(a)和(b)所示。尽管高压侧电流波形受到TA饱和的影响发生了畸变,但波形的总体相位差异特征仍然与TA正常传变时保持一致。即使 $K$ 值有所上升,但仍然没有超过阈值50%,使得保护依然能够被可靠闭锁。

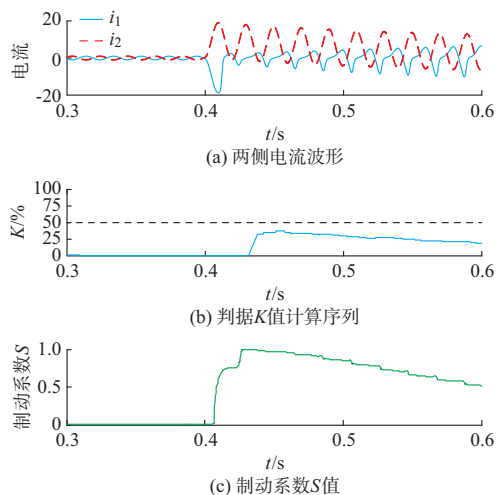


图4 算例4中电流波形及判据对比  
Fig. 4 Current waveforms and the criteria comparison in case 4

传统带制动特性的差动保护判据形式一般为 $|\dot{I}_1 + \dot{I}_2| > S|\dot{I}_1 - \dot{I}_2|$ (制动系数 $S$ 通常取0~1),采用传统判据对本算例进行仿真分析。如图4(c)所示为制动系数 $S$ 的结果,故障发生后制动系数 $S$ 的值很快上升接近1。此时,若要避免保护误动就只能采用较高的制动系数(例如 $S \geq 1$ ),但这同时会增加区内故障保护拒动的风险。

因此,在应对区外故障伴随TA饱和可能引发的保护误动问题上,本文所提判据性能优于传统带制动特性的差动保护判据。

### 5)算例5:单侧电源系统变压器区内接地故障

在 $t=0.4$  s时A相发生接地故障,故障发生后,电源侧电流越限,负荷侧电流为0,此时重构轨迹均落在坐标轴上,出现在第二、四象限内的点数为0,则计算得到的 $K$ 值为100%,保护能可靠动作。该

算例下电流波形及判据 $K$ 值见附录B图B3。

由算例1和3的仿真结果可知,对于区内故障和区外故障,其两侧电流重构特征轨迹的象限特征差异明显,保护能够依据 $K$ 值大小准确识别故障类型。在算例2和4中,尽管TA饱和导致波形发生畸变,使重构特征轨迹中少量点的特征发生改变,但对特征点总体分布影响较小,轨迹整体的象限特征并不会发生大的变化,使得 $K$ 值受到的影响有限,保护的可靠性得到了保证。算例5验证了本判据同样适用于单侧电源供电的系统。

## 4.2 动模验证

动态模拟试验模型及具体参数见附录C图C1。将变压器三角形侧空载,记录8组变压器试验算例。其中,区内 $F_1$ 处和区外 $F_2$ 处分别设置4组算例:①单相接地故障,TA正常传变;②单相接地故障伴随TA饱和;③三相接地故障,TA正常传变;④三相接地故障伴随TA饱和。

动模试验的系统频率为50 Hz,以4 kHz的采样频率(一个周期80个采样点)记录故障前后共500个采样点的试验结果。其中2组故障伴随TA饱和的算例试验结果如图5所示,电流波形以A相电流的标么值表示。

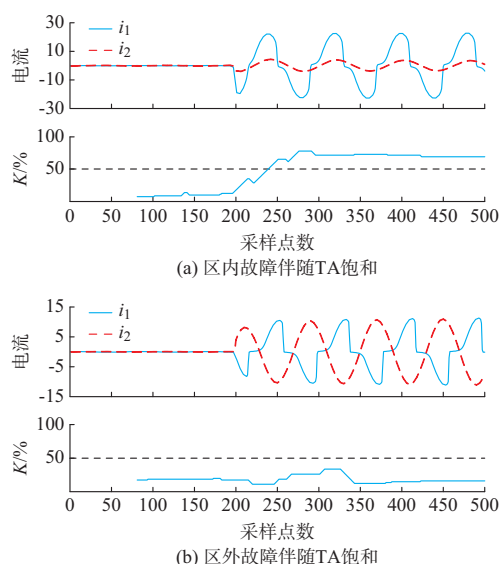


图5 电流波形及 $K$ 值计算结果(动模试验)

Fig. 5 Current waveforms and calculation results of  $K$  (dynamic simulation tests)

1)试验算例1:在第200个时间采样点处,区内 $F_1$ 处发生单相接地故障,且故障电流使 $TA_1$ 发生饱和,记录的电流波形以及计算的 $K$ 值如图5(a)所示。可以看出 $K$ 值在故障发生后的40个采样点(故障后半周期)已超过了动作整定值50%,保护能够

可靠且迅速动作。

2)试验算例2:在第200个时间采样点处,在区外 $F_2$ 处发生三相接地故障,并且 $TA_2$ 饱和。由图5(b)的试验结果可以看出, $K$ 值在故障发生后仍然保持在整定值(50%)以下,保护不会受到TA饱和的影响而误动。

限于篇幅,8组动模验证结果详见附录C表C1。

由记录的动模验证结果可知,发生区内故障时,即使TA发生饱和,使用本文所提判据也能准确识别,使保护正确动作;发生区外故障时,无论TA是否饱和,均能可靠闭锁保护。

## 5 结语

针对运行中变压器发生故障时TA饱和可能引起的差动保护误动或拒动的问题,利用变压器两侧电流在不同扰动情况下的相位特征差异,通过将两侧电流在二维空间坐标系中进行重构,得到两侧电流重构后的特征轨迹,利用重构特征轨迹在不同扰动下二维空间象限特征差异,提出了二维空间重构电流特征轨迹的变压器差动保护判据。该判据能够克服传统的差动保护区外故障时TA饱和引起的误动以及区内故障时TA饱和引起的拒动问题。仿真与动模实验结果验证了新判据的有效性。依据区外故障TA饱和最为严重时整定新判据的动作阈值,若应用于实际还需要结合大量的现场数据进一步完善和优化。此外,本文判据与识别励磁涌流之间的逻辑关系还有待进一步研究。

本文得到三峡大学学位论文培优基金的资助(2020SSPY061),谨此感谢。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 申洪明,宋璇坤,黄少锋,等.换相失败对TA传变特性及换流变差动保护的影响分析[J].电力自动化设备,2018,38(4):218-223.  
SHEN Hongming, SONG Xuankun, HUANG Shaofeng, et al. Effect of commutation failure on transfer characteristics of CT and differential protection of converter transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 218-223.
- [2] 罗慧,周卿松,苗洪雷,等.基于LMD母线差动保护CT饱和检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):49-54.  
LUO Hui, ZHOU Qingsong, MIAO Honglei, et al. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(12): 49-54.
- [3] 公茂法,夏文华,张晓明,等.基于HHT的抗CT饱和和变压器故障识别新方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(22):64-70.  
GONG Maofa, XIA Wenhua, ZHANG Xiaoming, et al. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 64-70.
- [4] 郑涛,陈佩璐,刘连光,等.计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响[J].电力系统自动化,2012,36(20):89-93.  
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Transferring characteristics of current transformer affected by DC magnetic bias and its impact on differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 89-93.
- [5] 翁汉琨,王胜,林湘宁,等.基于波形相似度的抗电流互感器饱和和变压器相位差动保护[J].电力系统自动化,2019,43(4):132-146.  
WENG Hanli, WANG Sheng, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity based transformer phase differential protection against current transformer saturation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 132-146.
- [6] 金瑞,鲍斌,时伯年.变压器差动保护的三种比率制动方式及其系数整定的研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(19):81-87.  
JIN Rui, BAO Bin, SHI Bonian. Research on three kinds of percentage restraint methods and their coefficient setting of transformer differential protection [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 81-87.
- [7] 浦南桢,翟学锋,袁宇波,等.P级TA饱和对数字式比率制动特性差动保护的影响[J].电力自动化设备,2003,23(4):76-80.  
PU Nanzhen, ZHAI Xuefeng, YUAN Yubo, et al. Impaction of P-type CT saturation on digital ratio-restrained differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 76-80.
- [8] 谭乾,张文魁,苗世洪,等.基于故障分量的新型变压器自适应比率差动保护[J].电力系统自动化,2011,35(17):86-91.  
TAN Qian, ZHANG Wenkui, MIAO Shihong, et al. A new transformer adaptive differential protection based on fault component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 86-91.
- [9] 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.  
LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA's saturation [J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4.
- [10] 王志鸿,郑玉平,贺家李.通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(5):19-24.  
WANG Zhihong, ZHENG Yuping, HE Jiali. A algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 12(5): 19-24.
- [11] 曹豫宁,李永丽,张兴华,等.基于小波变换的电流互感器饱和实时检测新判据[J].电力系统自动化,2001,25(10):27-30.  
CAO Yuning, LI Yongli, ZHANG Xinghua, et al. A new on-line criterion for current transformer saturation based on wavelet transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 27-30.
- [12] 李贵存,刘万顺,贾清泉,等.利用小波原理检测电流互感器饱和的新方法[J].电力系统自动化,2001,25(5):36-39.  
LI Guicun, LIU Wanshun, JIA Qingquan, et al. A new method for detecting saturation of current transformer based on wavelet transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 36-39.
- [13] 林湘宁,刘沛,高艳.基于数学形态学的电流互感器饱和和识别判据[J].中国电机工程学报,2005,25(5):46-50.  
LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 46-50.
- [14] 陈国锋.基于数学形态学的变压器差动保护的研究[D].北京:华北电力大学,2015.  
CHEN Guofeng. Research on transformer differential protection based on mathematical morphology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [15] 李旭,黄继东,倪传坤,等.不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(3):141-145.  
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [16] 毕大强,冯存亮,葛宝明.电流互感器局部暂态饱和和识别的研究[J].中国电机工程学报,2012,32(31):184-190.  
BI Daqiang, FENG Cunliang, GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 184-190.
- [17] 丛伟,张琳琳,程学启,等.基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J].电力自动化设备,2013,33(5):26-30.  
CONG Wei, ZHANG Linlin, CHENG Xueqi, et al. Criterion of current differential protection based on amplitude and phase difference of fault current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 26-30.
- [18] 潘书燕,郑玉平,吴崇昊,等.变压器新型励磁涌流识别元件[J].电力系统自动化,2011,35(19):63-67.  
PAN Shuyan, ZHENG Yuping, WU Chonghao, et al. A new identification component for inrush current of power transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 63-67.
- [19] 李贞,张明珠,倪传坤,等.变压器励磁涌流的自适应二次谐波分相制动方案[J].电力系统自动化,2013,37(6):121-124.  
LI Zhen, ZHANG Mingzhu, NI Chuankun, et al. An adaptive secondary harmonic split-phase restrained scheme for magnetizing inrush current in transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 121-124.
- [20] 翁汉琨,刘华,林湘宁,等.基于Hausdorff距离算法的变压器差动保护新判据[J].中国电机工程学报,2018,38(2):475-483.  
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the

Hausdorff distance algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483.

贾永波(1994—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail:282595271@qq.com

翁汉琍(1980—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail:honey\_weng@163.com

李振兴(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail:18800506@qq.com

(编辑 施冬敏)

## Transformer Differential Protection Criterion Based on Reconstructed Trajectory of Current Characteristics in Two-dimensional Space

WENG Hanli<sup>1</sup>, JIA Yongbo<sup>1</sup>, LI Zhenxing<sup>1</sup>, HUANG Jingguang<sup>1</sup>, LIN Xiangning<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>3</sup>

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;

3. Central Hubei Division of Maintenance Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

**Abstract:** With the influence of the fault current, the current transformers (TAs) on both sides of the transformer differential protection are prone to saturation, which would distort the current waveforms of the transformer and seriously affect the correct operation of the transformer differential protection. To solve the problem of misoperation or operation failure of transformer differential protection caused by TA saturation, the phase relationship characteristics between the currents on both sides of the transformer with different fault types are comparatively analyzed. A novel criterion for transformer differential protection is proposed to identify various faults accompanied by the TA saturation, which is based on the two-dimensional reconstruction of currents on both sides and the reconstructed characteristic trajectories. The results of simulation and experimental tests indicate that the proposed criterion has high reliability and sensitivity, as well as the high anti-saturation ability of TA.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677108).

**Key words:** transformer differential protection; reconstruction in two-dimensional space; current characteristic trajectory; phase angle feature; saturation of current transformer



## 附录 A

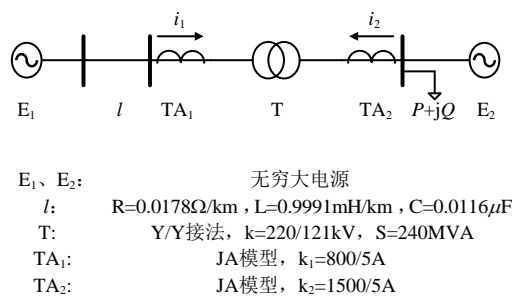


图 A1 双绕组变压器模型及参数  
Fig. A1 Double-winding transformer model and the parameters

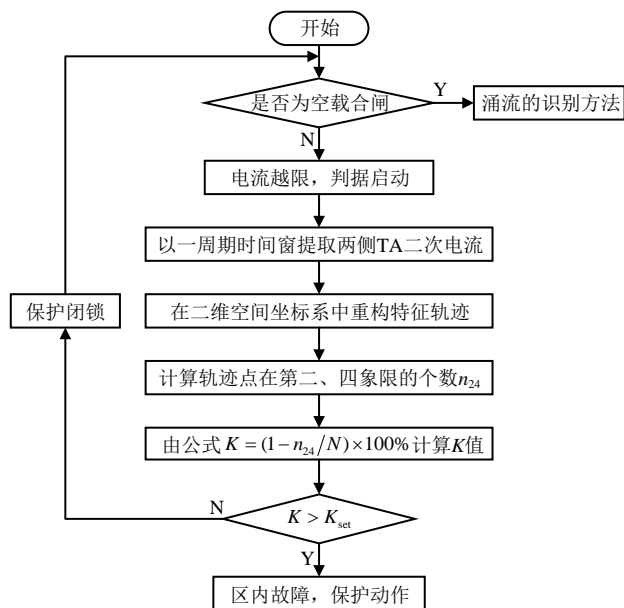


图 A2 保护判据流程图  
Fig. A2 Flow chart of the protection criterion

## 附录 B

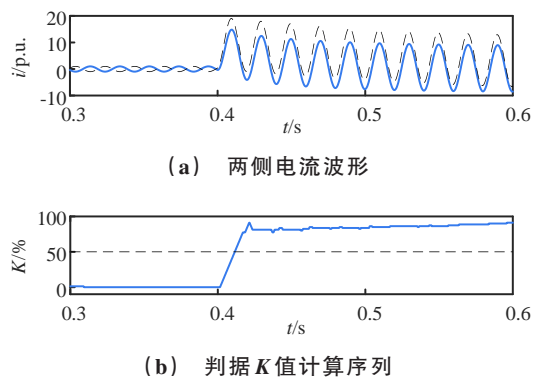
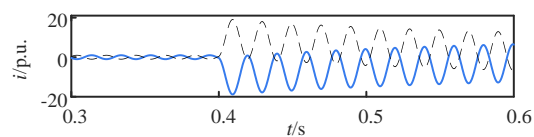
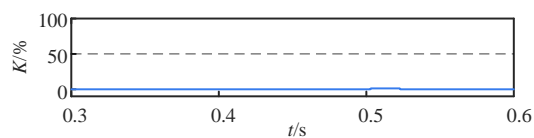


图 B1 电流波形及  $K$  值计算结果 (算例 1)  
Fig. B1 Current waveforms and the calculated value of  $K$  (case 1)





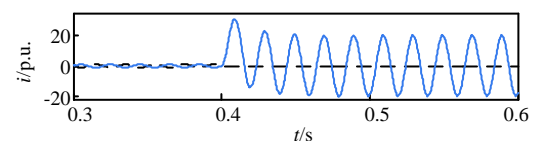
(a) 两侧电流波形



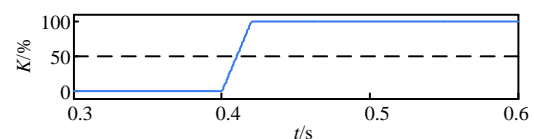
(b) 判据  $K$  值计算序列

图 B2 电流波形及  $K$  值计算结果 (算例 3)

Fig. B2 Current waveforms and the calculated value of  $K$  (case 3)



(a) 两侧电流波形

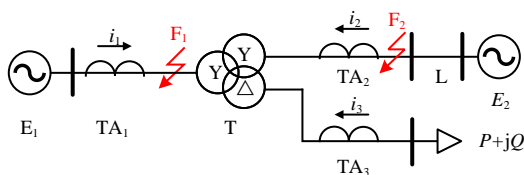


(b) 判据  $K$  值计算序列

图 B3 电流波形及  $K$  值计算结果 (算例 5)

Fig. B3 Current waveforms and the calculated value of  $K$  (case 5)

## 附录 C



$E_1$ :	$S=100\text{kVA}$
$E_2$ :	$S=15\text{kVA}$
T:	Y/Y/ $\Delta$ 接法, $k=462/462/380\text{V}$
$TA_1$ :	$k_1=20/5\text{A}$
$TA_2$ :	$k_2=50/5\text{A}$
$TA_3$ :	$k_3=100/5\text{A}$
$l$ :	$L=30\text{km}$ , $Z=2.36\angle 81.9^\circ$

图 C1 动态模拟试验模型

Fig. C1 Model of dynamic analog experiment

表 C1 动模验证结果

Table C1 Results of dynamic analog experimental tests

故障类型	是否动作	动作时对应故障后采样点
F <sub>1</sub> 单相接地	是	40(10 ms)
F <sub>1</sub> 单相接地且 TA 饱和	是	40(10 ms)
F <sub>1</sub> 三相接地	是	33(8 ms)
F <sub>1</sub> 三相接地且 TA 饱和	是	20(5 ms)
F <sub>2</sub> 单相接地	否	-
F <sub>2</sub> 单相接地且 TA 饱和	否	-
F <sub>2</sub> 三相接地	否	-
F <sub>2</sub> 三相接地且 TA 饱和	否	-