

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210870

直流偏磁影响下继电保护的误拒动机理分析及对策研究

马书民¹, 戎子睿¹, 林湘宁¹, 李正天¹, 汪致洵¹, 张培夫¹, 徐海波²

(1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 易事特集团股份有限公司, 广东 东莞 523808)

摘要: 偏磁电流经变压器中性点入侵电力系统后, 线路 CT 将发生一定程度的饱和, 影响二次系统的测量、控制等环节, 严重时甚至会诱发系统继电保护的误拒动, 对电力系统的安全稳定运行造成严重威胁。为此, 提出了一种基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案。首先, 分析直流偏磁对保护用 CT 的不利影响。在此基础上, 以线路保护与变压器保护为例, 揭示直流偏磁影响下继电保护的失效机理。进一步地, 利用相空间轨迹不受时域饱和影响的特点, 提出了一种基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案, 使得所提方案能有效应对 CT 饱和导致的保护失效难题。最后, 以典型保护失效场景为例, 对比传统方法与所提改进方案的保护动作情况, 验证了所提方案的有效性及其优越性。

关键词: 直流偏磁; CT 饱和; 线路保护; 相空间轨迹识别; 继电保护改进方案

Analysis and countermeasures of relay protection false rejection mechanism under the influence of DC bias

MA Shumin¹, RONG Zirui¹, LIN Xiangning¹, LI Zhengtian¹, WANG Zhixun¹, ZHANG Peifu¹, XU Haibo²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. EAST GROUP CO., LTD., Dongguan 523808, China)

Abstract: Once DC with high amplitude penetrates the power system through the neutral point of the transformer, line CT will saturate to some extent. This saturation will affect the measurement and control of the secondary system. When the DC bias is very serious, it will even induce an incorrect relay protection of the system. This poses a serious threat to the safe and stable operation of the power system. Therefore, an improved scheme of relay protection based on phase space trajectory identification is proposed. First, the adverse effect of DC bias on protective CT is analyzed. Then, taking line protection and transformer protection as examples, the failure mechanism of relay protection under the influence of DC bias is revealed. An improved relay protection scheme based on phase space trajectory identification is proposed, one which can effectively deal with the protection failure problem caused by CT saturation, based on the characteristic that the phase space trajectory is not affected by time-domain saturation. Finally, taking a typical protection failure scenario as an example, the effectiveness and superiority of the proposed scheme are verified by comparing the protection actions of the traditional method and the proposed scheme.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51877088).

Key words: DC bias; CT saturation; line protection; phase space trajectory recognition; improvement scheme of relay protection

0 引言

随着高压直流输电技术的快速发展与大规模应

用, 由此产生的直流偏磁问题也愈发突显, 逐渐引起人们的重视。诱发直流偏磁的因素有很多, 如直流系统单极闭锁运行、城市地铁泄露的杂散电流、地磁风暴等等。一旦偏磁电流经接地中性点侵入变压器绕组后, 会造成铁心振动加剧、谐波含量增加、测量系统误差增大等一系列问题, 对电网一/二次设

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51877088); 东莞市引进创新科研团队计划项目资助(201536000200036)

备的安全运行造成不利影响, 严重威胁了电网的安全稳定运行^[1-5]。举例而言, 1989 年加拿大魁北克电网某变电站受到直流偏磁的影响, 导致站内大量继电保护装置误动, 并诱发长达 9 h 的大停电事故, 给电力系统造成巨大损失^[1]。此外, 2013 年复-奉 ±800 kV 直流输电工程因单极不对称运行产生直流偏磁现象, 进而引起周边方山变电站的主变中性点直流电流超标。该直流偏磁现象导致站内的变压器振动加剧, 使得其抗短路故障能力下降, 于近区短路故障时相继损害^[2]。

事实上, 针对直流偏磁现象对电网一次设备的影响机理, 国内外专家学者已进行了大量深入研究^[6-8]。为缓解乃至消除直流偏磁对一次设备造成的不利影响, 专家学者们提出了许多有效治理策略, 并形成了完整体系。当前普遍使用的偏磁治理策略包括中性点串联电阻/电容法、中性点反向电流补偿法、接地极互联法以及断面功率支援法等^[9-12]。其中, 文献[11-12]提出了一种基于接地极互联的系统级偏磁治理策略, 通过改善直流电流在大地中的分布实现了偏磁电流的有效治理, 减轻了一次设备受到的损害。文献[13]则提出了一种基于多直流功率支援的直流偏磁治理策略, 该策略利用同一输电断面内多条直流输电线路可进行功率支援的特点, 在中性点主动生成反向不平衡电流, 减小流过一次设备的偏磁电流。

与直流偏磁对一次设备影响的成熟研究不同, 目前针对直流偏磁影响电网二次系统的研究较少, 且内容相对杂散^[14-17]。其中, 文献[14-15]分析了 HVDC 型直流偏磁和 GIC 型直流偏磁对变压器差动保护的不利影响, 并指出 CT 饱和是导致差动保护失效的根本原因。文献[18-20]进一步量化研究了直流偏磁对 CT 的影响, 通过构建保护用 CT 的等效电磁模型, 推导得出了直流偏磁以及剩磁作用下 CT 饱和时间的通用计算公式。基于上述研究, 文献[21-24]提出了多种针对变压器保护的优化措施, 解决了直流偏磁下变压器保护失效的问题。

可以看出, 上述文献均局限于直流偏磁对变压器保护的影响。事实上, 由于保护用 CT 的测量误差, 直流偏磁同样会对线路保护的可靠性造成影响, 但鲜有文献涉及到该方面。此外, 目前所提出的保护改进方案仅适用于变压器保护, 所提改进方案对线路保护的可行性尚未有人研究, 因此亟需寻找一种具备普适性的保护改进方案。

为此, 本文全面研究了直流偏磁对系统继电保护的不利影响, 从线路保护与变压器保护出发, 揭示直流偏磁诱发继电保护失效的机理, 并进一步提

出了一种能有效应对直流偏磁现象且同时适用于线路保护与变压器保护的继电保护改进方案。首先, 分析线路正常与故障工况下直流偏磁对 CT 饱和的影响, 在此基础上, 分析直流偏磁造成线路保护与变压器保护失效的机理。进一步地, 利用相空间轨迹不受时域饱和影响的特点, 提出了一种基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案, 兼顾保护的可靠性与速动性。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了直流偏磁影响下不同继电保护的等效模型, 仿真验证了所提保护改进方案的有效性。

1 直流偏磁对 CT 饱和的影响分析

保护用电流互感器其简化等效模型如图 1 所示, 图中, Z_1 表示 CT 一次侧阻抗, R 表示 CT 二次侧的绕组电阻与负载电阻之和, L_m 表示励磁支路的励磁电感, i_1 、 i_2 分别表示 CT 一次侧电流(折算到二次侧)和二次侧电流, i_m 表示励磁电流。此外, 采用分段函数特性描述不同条件下的励磁特性, 每段函数对应的励磁电感大小为 L_k , 其中 $k=1, \dots, n$ 。

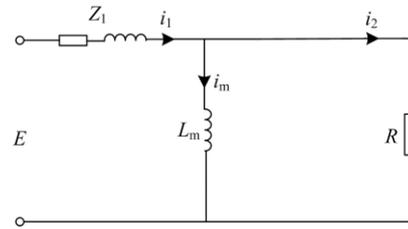


图 1 电流互感器的简化等效模型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of simplified equivalent model of current transformer

结合上述电路图, 分别对处于稳态运行状态以及处于故障后暂态状态这两种情况进行电路分析。

1.1 系统稳态运行状态

根据基尔霍夫电流定律, 保护用 CT 正常工作时均满足式(1)。

$$\frac{1}{R} \frac{L_m \cdot di_m}{dt} + i_m = i_1 \quad (1)$$

若某一时刻发生直流偏磁, 则一次电流 i_1 满足 $i_1 = I \cos \omega t + I_{dc}$, 其中 I 和 ω 分别为工频电流的幅值和频率, I_{dc} 为此时偏磁电流的幅值。考虑到 CT 磁通的累计效应, 其短时间内不会发生饱和, 式(1)仍成立。此时可求解得到偏磁场景下励磁电流 i_m 的表达式为

$$i_m = I \cos \alpha \cos(\omega t - \alpha) - I \cos^2 \alpha \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + I_{dc} \quad (2)$$

式中: $\tau = L_m/R$; $\alpha = \arctan(\omega \cdot L_m/R)$ 。因此, 发生直流偏磁后, CT 的励磁电流始终存在一个直流

偏置, 其将对铁心磁通的工作点产生持续影响。但当偏磁电流较小时, CT 的工作点位于原点附近, 此时产生的偏置磁通较小, 故二次电流的畸变程度非常轻微, 因此稳态场景下一般不会造成当前配置的各类保护误动作。

1.2 系统故障后暂态状态

当系统受到偏磁影响且发生故障后, 流经 CT 一次侧的电流 i_1 主要由直流偏磁电流、故障电流工频分量、故障电流衰减直流分量三部分组成, 具体如式(3)所示。

$$i_1 = I_{dc} + I_f(-\cos\omega t + e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (3)$$

式中: I_f 为除直流偏磁外故障电流稳态峰值; T_1 为系统的一次时间常数。此外, 将 CT 铁心的磁通记为 ϕ , 可列出 CT 的电磁暂态方程如式(4)所示。

$$\frac{d\phi}{dt} + \frac{\phi}{T_2} = Ri_1 \quad (4)$$

式中, T_2 为 CT 二次侧的时间常数。

若计及 CT 中剩磁影响, 则可联立解出当偏磁场景下发生故障时 CT 铁心磁通的表达式, 如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \phi = & \frac{L_m I_{dc}}{K_n} + \frac{L_m I_f}{K_n} \frac{T_1}{T_1 - T_2} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) + \\ & \frac{L_m I_f}{K_n} \frac{e^{-\frac{t}{T_2}} - \cos\omega t - \omega T_2 \sin\omega t}{1 + \omega^2 T_2^2} + \phi_r e^{-\frac{t}{T_2}} \end{aligned} \quad (5)$$

考虑到 $\omega^2 T_2^2 \ll 1$ 且 $T_2 \ll T_1$, 故 e^{-t/T_2} 衰减较为缓慢, 在故障后一个周内可认为保持不变。因此, 式(5)可简化为式(6), 此时 CT 铁心磁通除包含故障电流产生的磁通分量外, 还包含偏磁电流及剩磁产生的恒定磁通。

$$\phi = \phi_{dc} + \phi_r + \phi_m \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) - \sin\omega t \right] \quad (6)$$

由式(6)可知, 直流偏磁产生的偏置磁通 ϕ_{dc} 和剩磁 ϕ_r 对 CT 铁心磁通运行点的影响机理类似。当 ϕ_{dc} 与 ϕ_r 方向与非周期分量方向保持一致时, 偏置磁通将显著抬高铁心磁通, 使得铁心更容易饱和, 缩短区外故障时 CT 的起始饱和时间且加剧饱和程度, 最终使 CT 处于严重饱和状态。

综上, 无论系统处于稳态运行或故障后暂态状态, 直流偏磁均会对 CT 造成显著影响。

2 直流偏磁影响下的线路保护与变压器保护的误拒动机理分析

2.1 直流偏磁导致线路保护失效的机理分析

220 kV 及以上电压等级的线路保护以纵联电

流差动保护、距离纵联保护为主^[25]。

1) 纵联电流差动保护失效的机理分析

纵联电流差动保护能有效辨识区内故障, 且不受系统振荡、非全相运行的影响, 具备保护范围广、动作速度快的优势, 常作为线路的主保护使用。典型的纵联电流差动保护的判据分别如式(7)、式(8)所示。

$$|\dot{I}_M + \dot{I}_N| \geq I_{set} \quad (7)$$

$$|\dot{I}_M + \dot{I}_N| \geq k |\dot{I}_M - \dot{I}_N| \quad (8)$$

式中: I_M 和 I_N 分别是利用线路两端 CT 测量得到的电流值; I_{set} 为综合考虑不平衡电流、最大负荷电流后计算得到的整定值; k 为制动系数, 取值通常为 0~1。可以看出, 当线路两端测量电流的波形差异过大(超过整定值 I_{set}), 纵联电流差动保护将有效动作。

然而, 由第 1 节分析可知, 一旦发生直流偏磁现象, 两端 CT 的测量电流都会因 CT 饱和出现不同程度的畸变。事实上, 电流波形的畸变程度与 CT 饱和的程度有关, 而 CT 的饱和程度与 CT 本身性质、剩磁以及铁心磁通等多种因素有关。特别是, 在偏磁影响的场景下, 偏置磁通 ϕ_{dc} 、剩磁 ϕ_r 与非周期分量的总磁通 ϕ_m 的初始方向将对 CT 的饱和速度产生极大影响。一旦三者方向保持一致时, CT 将快速进入饱和状态, 使得测量波形发生显著畸变; 而若三者方向不一致时, CT 进入饱和的时间将显著增长。在上述背景下, 一旦两端 CT 发生饱和的时间存在显著差异, 其电流波形也将产生显著差异, 进而诱发纵联电流差动保护误动。

因此, 在偏磁场景下, 若发生区外故障, 该判据很可能由于电流畸变程度的不同而成立, 使得保护发生误动。

2) 距离纵联保护失效的机理分析

距离纵联保护利用故障发生时测量电压与测量电流同时变化的特征, 计算得到反映故障位置与保护安装位置距离的比值, 并根据该比值的大小进行故障诊断, 具体判据在此不赘述。

一旦直流电流侵入变压器中性点, 如图 2 所示, 其接地侧所连线路的电流将产生直流偏置(图中所示电流 $i_{dc}/3$), 即流过 CT 一次侧的电流 i_a 显著增大。随着入侵电流的增大, CT 的饱和程度也显著提升, 其测量电流(图中 i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1})以及零序电流发生畸变。此外, 考虑到偏磁电流 i_{dc} 和变压器二次侧绕组阻抗 r_2 均较小, 因此偏磁电流接入对线路测量电压的影响可忽略不计。

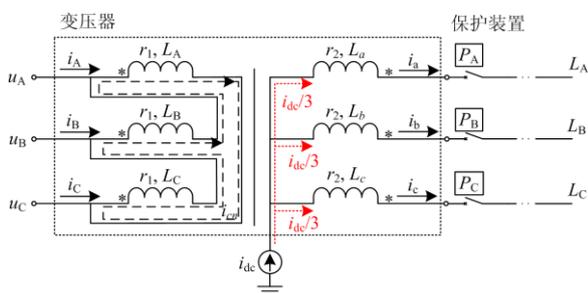


图2 偏磁电流入侵变压器中性点的等效示意图

Fig. 2 Equivalent schematic diagram of magnetic bias current invading the neutral point of transformer

综上,若发生直流偏磁现象,距离纵联保护的测量电压几乎不变,而测量电流随CT饱和程度的加深发生显著畸变,因此测量阻抗的大小发生明显变化,进而造成保护的失效。

2.2 直流偏磁导致变压器保护的失效机理分析

除影响线路距离保护外,直流偏磁还将对变压器保护的可靠性造成严重威胁。目前,普遍采用差动保护作为变压器的主保护,其性能易受CT饱和的影响。如图2所示,一旦偏磁电流经中性点入侵变压器绕组,根据第1节分析内容可知,变压器接地侧将出现严重的CT饱和现象。然而,在变压器的三角侧,传变电流将在变压器绕组中形成环流,无法流经外部线路,因此三角侧的CT依旧处在正常工作状态。综上,此时变压器差动保护失去可靠性。为解决由于CT饱和带来的保护失效问题,国内外专家学者已提出了多种解决方案,目前常见的包括时差法以及二次谐波制动法。

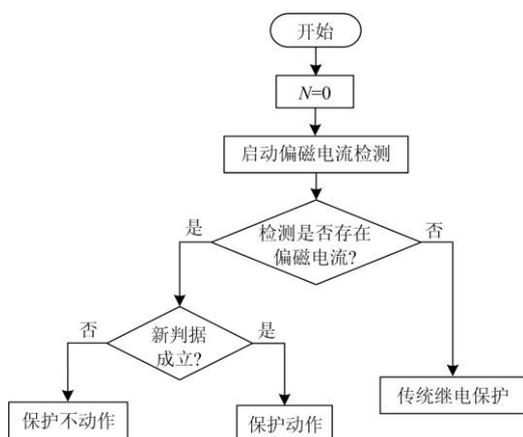


图3 基于相空间轨迹识别的继电保护方案流程图

Fig. 3 Flowchart of relay protection scheme based on phase space trajectory identification

时差法的原理在于,由于电感电流不能突变,因此在故障发生后的短时间内(3~5 ms)CT不会发

生饱和,具有正常的传变特性。为此,通过检测两侧CT出现差流的时间差,即可正确判别CT饱和。然而,由第1节分析可得,由于直流偏磁的影响,区外故障时的CT起始饱和时间将显著提前,使得区外故障CT饱和时的时差缩短,进而导致传统时差法的可靠性面临挑战。

二次谐波制动法的原理在于,CT饱和时将产生大量的谐波电流,其中:若CT处于暂态饱和,谐波以2次谐波为主;若CT处于稳态饱和,谐波以3次谐波为主。由于区外故障CT保护一般均为暂态饱和,因此也常利用二次谐波含量构造CT闭锁判据,即当差流中二次谐波含量大于阈值时,差动保护闭锁。然而,由于直流偏磁的影响,CT饱和趋于稳态饱和,此时区外故障时的二次谐波含量有可能小于阈值,导致二次谐波制动法失效。

3 消弭直流偏磁不利影响的继电保护改进方案研究

上述分析揭示了直流偏磁诱发继电保护失效的机理:当系统受到直流偏磁影响时,系统内部的保护用CT将发生严重饱和,进而造成继电保护失去其可靠性。

因此,为有效消弭直流偏磁对继电保护造成的不利影响,应探寻一种不受CT饱和影响的继电保护判据。为此,本文提出了一种基于相空间轨迹识别的继电保护补充判据,在传统保护的基础上,利用相空间不受时域饱和影响的特点,将监测信息转化为相空间信息,利用相空间轨迹躲过CT饱和带来的不利影响,形成一套基于相空间轨迹识别判据的继电保护方案。

3.1 相空间原理及其在直流偏磁场景下的应用

根据第二节分析可知,直流偏磁将导致CT在时域上的测量电流波形缺损或畸变,最终导致继电保护失去可靠性。针对这一现象,现有研究表明^[26-27],一个时域上发生缺损或畸变的电流波形,其在频域仍表现为连续、随机分布的频谱信号,因此轻度CT饱和对重构曲线圆心轨迹特性的影响可忽略不计。

在此基础上,文献[28]和文献[29]初步探索了相空间重构法在继电保护领域的应用,利用公式推导出相空间重构轨迹的平面分布,并基于分布规律提出了一种基于相空间轨迹识别判据的继电保护新策略,以有效应对由于CT饱和造成的保护失效问题。需要注意的是,上述文献解决的是采样数据同步对时出现误差、变压器发生涌流等特殊场景下的问题,但显然,其采用的相空间轨迹识别判据也为

解决偏磁场景下的继电保护失效难题提供了有效思路。

为此, 本文将相空间轨迹识别判据的应用范围进行扩展, 尝试性地将该判据运用于直流偏磁场景下, 分析该判据在直流偏磁场景下的有效性, 并验证该判据针对线路保护与变压器保护的普适性。

然而, CT 发生饱和后的测量电流相比于 CT 饱和前的电流将产生显著畸变及缺损, 且 CT 饱和的程度与 CT 本身性质、剩磁以及铁心磁通等多种因素有关, 因此很难应用现有的经典信号处理方法对其进行定量分析^[30]。为此, 采用定性方法进行分析: 当 CT 饱和后, 其测量电流将产生更多的二次及三次谐波, 具体体现在倍频分量的幅值变化。但事实上, 其幅值上的变化对基频以及倍频分量的卷积结果并不产生影响, 因此文献[28]和文献[29]针对相空间轨迹重心落点的轨迹推导仍然成立, 其重心分布规律在直流偏磁场景下仍具有适应性。

综上, 归纳相空间轨迹识别判据如下: 在直流偏磁诱发的 CT 饱和场景下, 计算所选一维序列的二维相空间轨迹的重心落点, 即可有效判别区内故障与区外故障: 若轨迹重心落于第 III 象限, 则认为发生区内故障; 若轨迹重心落于非第 III 象限, 则认为发生区外故障。

因此, 基于相空间轨迹识别的继电保护方案流程如图 3 所示, 具体如下:

首先, 通过在线路或变压器中性点装设目前广泛研究的直流电流检测装置, 检测是否存在直流电流。若没有检测到偏磁电流, 则执行传统继电保护流程, 具体流程同第 2 节所述, 在此不赘述; 而一旦检测到偏磁电流, 则保护转入所提新判据分支。

具体而言, 所提判据选取故障分量中的瞬时功率作为一维时间序列进行相空间重构, 瞬时功率差 Δp 的具体计算方法如式(9)所示。

$$\Delta p = \Delta u_1 \cdot \Delta i_1 + \Delta u_2 \cdot \Delta i_2 \quad (9)$$

式中: Δu_1 和 Δu_2 分别表示故障前后距离故障点相邻母线的测量电压差; Δi_1 和 Δi_2 分别表示故障前后距离故障点相邻母线的测量电流差。

$$\overline{\Delta p_2(m)} = \Delta p(m) \cdot \bar{x} + \Delta p(m + \tau) \cdot \bar{y} \quad (10)$$

式中: m 表示时间序列上采样点的序号; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示二维相空间中坐标轴的单位矢量; τ 表示延迟时间, 本文取值为 2.5 ms。

基于二维相空间坐标, 计算相空间轨迹中一个完整轨迹周期(40 个采样点)的重心, 其坐标记为 (x, y) , 如式(11)所示。

$$x = \sum_{k=1}^{40} \Delta P_{xk} / 40, \quad y = \sum_{k=1}^{40} \Delta P_{yk} / 40 \quad (11)$$

若 $x < 0$ & $y < 0$, 则判据成立, 判断为内部故

障, 保护正常动作; 反之, 则判据不成立, 判断为外部故障, 保护可靠不动作。

3.2 基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案

然而, 上述结论仅适用于 CT 刚刚进入饱和的情形。事实上, 当偏磁电流持续时间较长时, 由于累积效应的存在, 也将造成 CT 铁心磁通的不断累积, 最终导致 CT 进入深度饱和区域。此时一旦发生区外故障, 基于相空间轨迹识别的继电保护策略将失去可靠性。为解决上述问题, 本文改进了原有的基于相空间轨迹识别的继电保护方案, 使得保护能在任何直流偏磁情况下均有效正常工作。

为确保所提改进保护方案在所有直流偏磁电流大小及持续时间下均能可靠工作, 需对传统保护方案失效的机理进行分析。事实上, 长时间、高幅值偏磁电流导致 CT 出现深度饱和, 使得故障后第一个周波内电流出现严重失真。此时, 电流波形的畸变在频域上已不再呈现随机分布的特性, 因此 CT 深度饱和对重构轨迹圆心的影响不容忽视, 进而导致基于相空间轨迹识别的变压器保护无法正确判别; 然而, 到了第二个周波及以后, 由于故障电流非周期分量的衰减及故障电流工频分量负向磁通的去磁作用, 此时偏磁电流造成的 CT 饱和加剧现象已较为微弱, 依靠前述相空间轨迹识别判据已可以正确动作。

基于上述原理, 在严重偏磁场景下, 可通过适当延迟保护动作时间(躲过直流偏磁导致的 CT 饱和和最严重时刻)来缓解直流偏磁造成的不利影响, 通过适当牺牲保护的速动性来提升保护的可靠性。

为此, 对 3.1 节所提基于相空间轨迹识别的继电保护新方案进行改进, 确保在所有直流偏磁电流大小及持续时间下继电保护均能可靠工作。保护方案的改进包括: 若判断存在偏磁电流, 保护流程将转入主判据延迟动作分支, 使得用于判断重心轨迹的采样点适当延后 N_{set} 个, 以躲过饱和和最严重时刻。

基于此, 设计提出了一种基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案, 兼顾继电保护的可靠性及速动性, 其流程如图 4 所示。

4 仿真实验

为验证上述分析, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中建立了等效电路模型, 以大小恒定的直流电源模拟偏磁电流。输电线路统一采用分布参数模型, 线路参数如下所示:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.027 \, \Omega/\text{km}, \quad l_1 = 1.333 \, \text{mH}/\text{km}, \\ c_1 &= 0.0127 \, \mu\text{F}/\text{km}, \quad r_0 = 0.195 \, \Omega/\text{km}, \\ l_0 &= 4.126 \, \text{mH}/\text{km}, \quad c_0 = 0.0775 \, \mu\text{F}/\text{km}. \end{aligned}$$

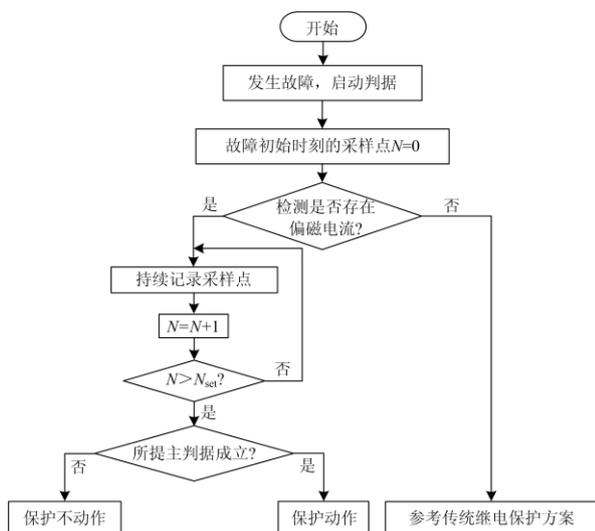


图 4 基于相空间轨迹识别的保护改进方案流程图

Fig. 4 Flowchart of protection improvement scheme based on phase space trajectory identification

4.1 偏磁电流导致线路保护失效的验证

首先, 探究偏磁电流对线路保护的影响。为此, 构建如图 5 所示的仿真模型, 部分重要参数如表 1 所示。

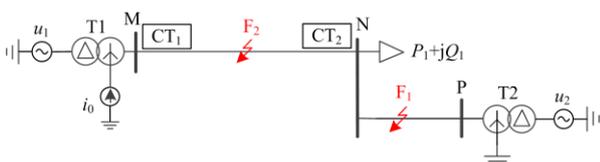


图 5 考虑区内外故障的等效仿真模型

Fig. 5 Equivalent simulation model considering fault inside and outside the zone

表 1 仿真模型的元器件参数

Table 1 Component parameters of simulation model

参数	数值大小	
变压器 T1	额定容量/MVA	100
	变压器变比	110 kV/230 kV
	膝点电压/p.u.	1.25
变压器 T2	额定容量/MVA	100
	变压器变比	230 kV/10.5 kV
	膝点电压/p.u.	1.25
互感器 CT	一次/二次绕组	1/160
	二次阻性负载/ Ω	2.5
	二次感性负载/H	0.8×10^{-3}
线路 MN	长度/km	200
线路 NP	长度/km	75

1) 纵联电流差动保护

设定单相接地故障发生在距母线 N 15 km 处的 F_1 点处, 故障时间设定为 0.4 s。此外, 使得互感器

CT_1 、 CT_2 剩磁参数外的其余参数保持一致, CT_1 的剩磁参数设为 0 T, CT_2 的剩磁参数设为 0.5 T。在此条件下, 对比不同偏磁电流大小场景下两端测量电流的畸变程度。

(1) 流入变压器 T1 的中性点电流为 3 A (图 6)

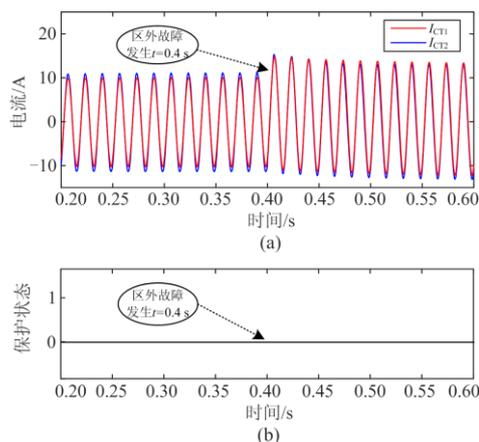


图 6 区外故障下线路差动保护示意图 ($I_{dc} = 3 A$)

Fig. 6 Schematic diagram of line differential protection under out-of-area faults ($I_{dc} = 3 A$)

(2) 流入变压器 T1 的中性点电流为 50 A (图 7)

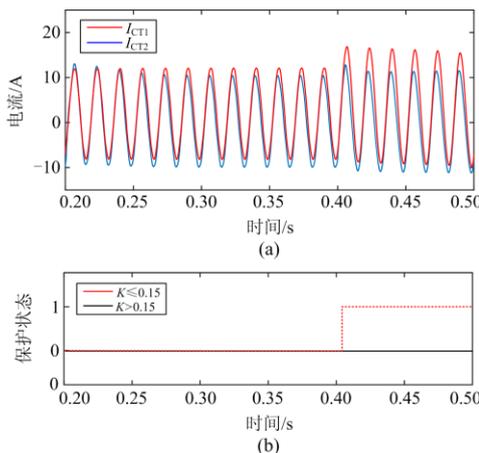


图 7 区外故障下线路差动保护示意图 ($I_{dc} = 50 A$)

Fig. 7 Schematic diagram of line differential protection under out-of-area faults ($I_{dc} = 50 A$)

其中, 当偏磁电流较小时 (图 6 所示结果), 差动保护能有效工作。然而, 随着偏磁电流的增大 (图 7 所示结果), 区外故障很可能诱发线路差动保护的误动作。特别是, 通过穷举制动系数 k 的取值后发现, 在外部条件保持不变的基础上, 当 k 的取值大于 0.15 时, 直流偏磁影响下的电流相量差动保护能正常工作, 不会发生误动; 然而, 若 k 的取值小于等于 0.15, 此时电流相量差动保护将由于直流偏磁的影响发生误动作。

2) 线路距离保护

在上述模型基础上, 设定单相接地故障发生在距母线 M 120 km 处的 F_2 点处, 故障时间设定为 0.4 s。此外, M 侧的距离 I 段保护有效范围是 150 km, 距离 II 段保护的有效范围是线路全长。

基于上述条件, 对不同偏磁电流大小场景下距离保护的可靠性进行仿真验证。

(1) 流入变压器 T1 的中性点电流为 3 A

此时 CT 仍处于正常工作状态, 其中流经 M 侧电流互感器的实际电流 I_A 与测量电流 I_{SA} 波形如图 8(a) 所示, 保护动作特性如图 8(b) 所示, 整个过程的阻抗圆特性如图 8(c) 所示。

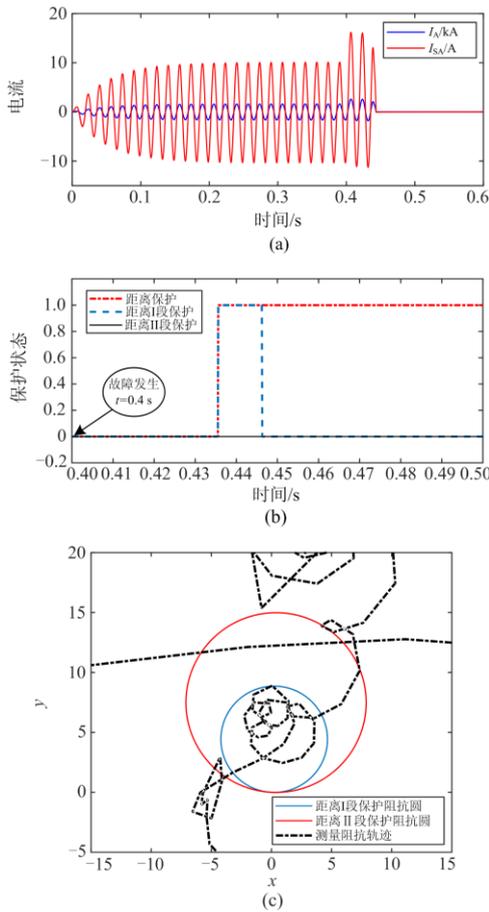


图 8 区内故障下线路距离保护示意图 ($I_{dc} = 3 \text{ A}$)

Fig. 8 Diagram of line distance protection under fault in the area ($I_{dc} = 3 \text{ A}$)

其中, 图 8(b) 中“0”表示保护不动作, “1”表示保护动作, 可以看出, 当 0.4 s 发生单相接地故障时, 距离保护可靠动作。

(2) 流入变压器 T1 的中性点电流为 50 A

此时 CT 仍处于正常工作状态, 其中流经 M 侧电流互感器的实际电流 I_A 与测量电流 I_{SA} 波形如图

9(a) 所示, 保护动作特性如图 9(b) 所示, 整个过程的阻抗圆特性如图 9(c) 所示。

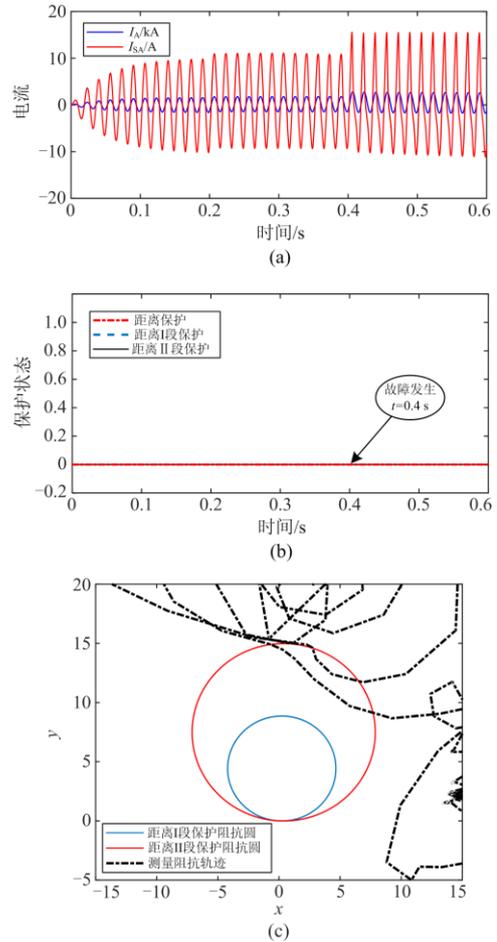


图 9 区内故障下线路距离保护示意图 ($I_{dc} = 50 \text{ A}$)

Fig. 9 Diagram of line distance protection under fault in the area ($I_{dc} = 50 \text{ A}$)

可以看出, 随着偏磁电流的逐渐增大, 传统距离保护从可靠动作转变为拒动, 失去其可靠性。

4.2 偏磁电流导致变压器保护失效的验证

为探究直流偏磁对变压器保护的影响, 搭建图 10 所示模型, 其中, 部分重要元器件参数如表 1 所示, 线路参数如前文所述, 在此不赘述。

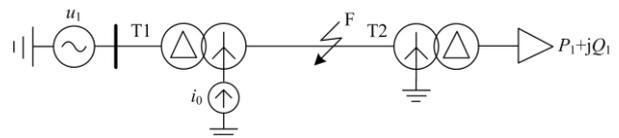


图 10 直流偏磁影响下含变压器的典型电路

Fig. 10 A typical circuit with a transformer under the influence of DC bias

设置仿真条件如下: 偏磁电源 i_0 在 0.1 s 时接入变压器 T1 的接地极, 且一直持续到仿真结束; 系

统在 0.2 s 时于 F 处发生单相金属性接地故障, 故障持续 5 s。

1) 直流偏磁对时差法的影响

仿真对比变压器 T1 实际电流波形与测量电流波形的畸变程度, 其结果如图 11 所示。其中, 图 11(a)为未发生直流偏磁时的电流波形, 图 11(b)为发生直流偏磁时的电流波形。

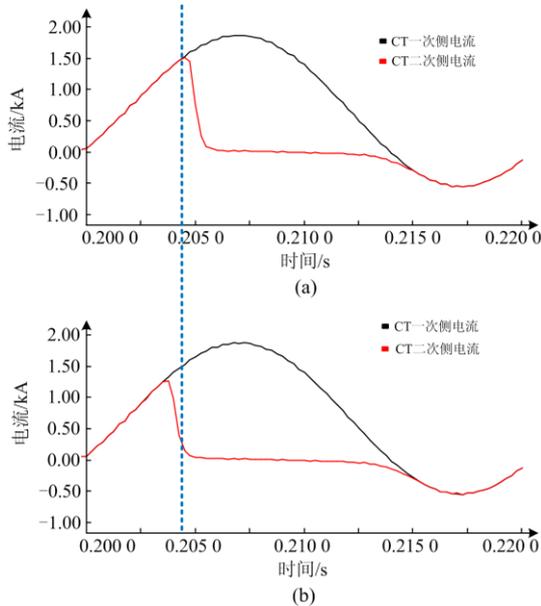


图 11 直流偏磁影响下电流互感器的起始饱和时间
Fig. 11 Initial saturation time of current transformer under the influence of DC bias

由图 11 可知, 无直流偏磁影响以及受到直流偏磁影响这两种情形下的测量电流起始饱和的时间分别为 0.204 4 s 和 0.203 1 s, 其差值约为 1.2 ms。可以看出, 发生外部短路故障后, CT 在未发生偏磁时的起始饱和时间明显小于发生直流偏磁时 CT 的起始饱和时间, 对时差法的可靠性造成严重威胁。

2) 直流偏磁对二次谐波制动法的影响

除此之外, 进一步探究直流偏磁对二次谐波制动法的影响, 采用图 10 所示模型, 各元件参数均保持不变。设置偏磁电源 i_0 在仿真开始时刻接入变压器 T1 的接地极, 且一直持续到仿真结束; 设置系统在 2 s 时于 F 处发生单相金属性接地故障, 故障持续 5 s。仿真结果如下所述。

(1) 无直流偏磁发生

无直流偏磁发生时, 流入变压器中性点的电流大小为 0 A, 此时变压器 T1 两侧差动电流的大小及其二次谐波含量波形如图 12 所示。

由图 12 可知, 发生区外故障后, 由于 CT 饱和, 差动电流显著增大且含有大量二次谐波分量。第 2.020 s 的二次谐波含量为 41.7%, 大于阈值 15%,

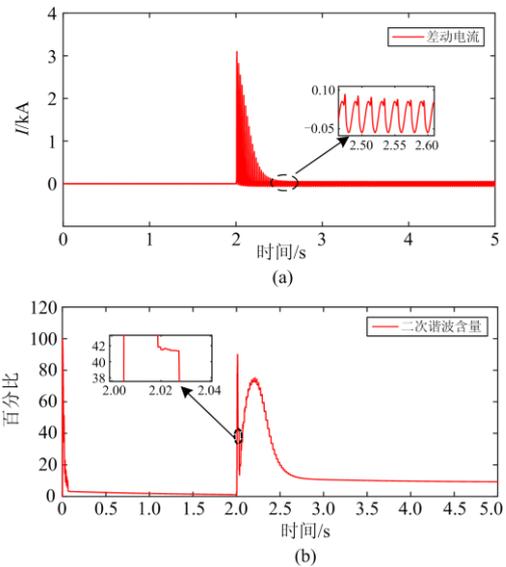


图 12 无偏磁情况下变压器二次谐波制动法结果
Fig. 12 Results of the secondary harmonic braking method in the case of no bias

差动保护闭锁; 2.576 s 时二次谐波含量减至阈值 15% 以下, 差动保护开放, 但由于此时差动电流标幺值为 0.24 p.u., 小于制动电流 0.62 p.u., 差动保护不会误动。综上, 无偏磁情况下变压器差动保护不会误动。

(2) 发生直流偏磁现象

当发生直流偏磁时, 设置流入变压器中性点的电流大小为 20 A, 此时变压器 T1 两侧差动电流的大小及二次谐波含量波形如图 13 所示。

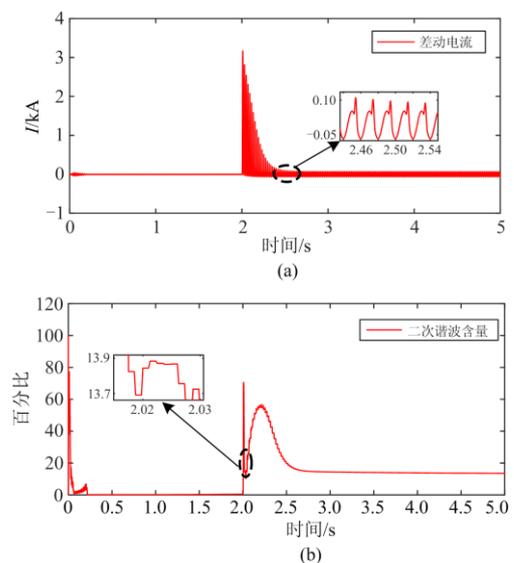


图 13 直流偏磁下变压器二次谐波制动法结果
Fig. 13 Results of the secondary harmonic braking method under DC bias

由图 13 可知,在偏磁场景下,发生区外故障后,由于 CT 饱和,差动电流显著增大且含有大量二次谐波分量,2.020 s 时二次谐波含量约为 13.8%,小于阈值 15%,差动保护不会闭锁。此时,差动电流大于制动电流,差动保护误动。

上述算例说明,若 CT 长时间处于直流偏磁工况下,其传变特性将发生明显畸变。特别地,在故障发生后的第一个周波内,差动电流的二次谐波含量将显著降低,对传统二次谐波制动判据的可靠性造成严重威胁。

4.3 基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案的可靠性验证

相比于传统相空间轨迹识别方案,所提改进方案通过适当延迟数据信息采集时间,躲过故障后第一个周波内的最严重 CT 饱和,进而实现保护的正确动作。接下来,分别从线路保护以及变压器保护两方面验证所提改进方案的可靠性及优越性。其中,后文统一将 3.1 节所提保护方案命名为保护方案 1,将 3.2 节所提的改进方案命名为保护方案 2。

1) 所提改进方案在线路保护中的应用

为证明所提改进方案在线路保护中的可靠性,选取不同大小的偏磁电流作为场景,仿真对比保护方案 2 与保护方案 1 之间的优劣性。

(1) 短时间注入幅值为 50 A 的偏磁电流,发生区内单相金属性故障

采用 4.1 节所构建的仿真模型,假设注入偏磁电流 $i_0 = 50 \text{ A}$,此时分别采用传统方案与改进判据对故障进行分析,具体结果如下所述。

首先结合式(8)针对瞬时功率进行相空间重构,其中故障后 3 个周波的相空间轨迹如图 14 所示。

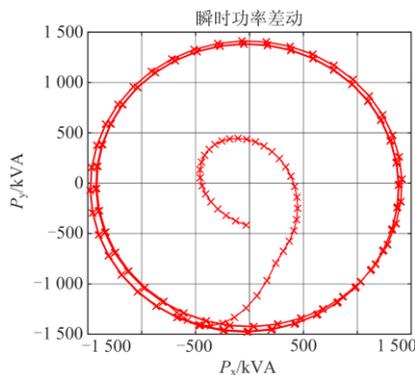


图 14 针对瞬时功率的相空间轨迹重构图(场景①)

Fig. 14 Phase space trajectory remapping for instantaneous power (Scenario ①)

根据仿真结果可知,此时故障后数个周波内所有的相空间轨迹重心一直落在第 III 象限,保护方案

1 与保护方案 2 的动作情况均如图 15 所示,相空间判据均可靠动作。

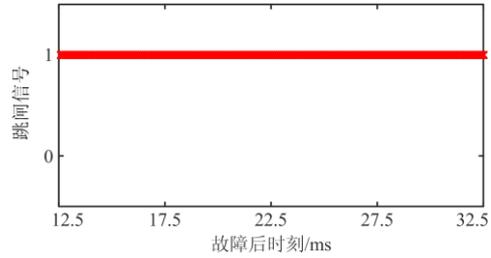


图 15 场景①下线路保护的保护动作情况

Fig. 15 Protection action of line protection in Scenario ①

(2) 长时间注入幅值为 50 A 的偏磁电流,发生区外单相金属性故障

在场景①的基础上,保持仿真模型不变,改变故障发生位置,选择区外故障 F2。进一步地,分别利用传统方案与所提改进方案对区外故障进行判断,其流程同(1)所述,故障后 3 个周波内的相空间轨迹如图 16 所示。

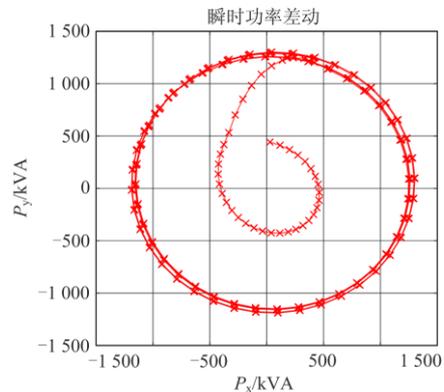


图 16 针对瞬时功率的相空间轨迹重构图(场景②)

Fig. 16 Phase space trajectory remapping for instantaneous power (Scenario ②)

结合图 16 可知,此时故障后数个周波内所有相空间轨迹重心一直落在第 III 象限以外的象限,保护方案 1 与保护方案 2 的动作情况均如图 17 所示,相空间判据均可靠不动作。

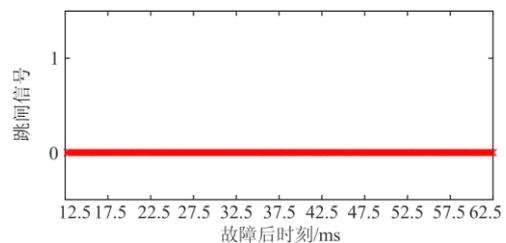


图 17 场景②下线路保护的保护动作情况

Fig. 17 Protection action of line protection in Scenario ②

2) 所提改进方案在变压器保护中的应用

为证明所提改进方案在变压器保护的优越性及可靠性, 选取不同大小的偏磁电流作为场景, 仿真对比保护方案 1 与保护方案 2 之间的优劣性。

(1) 长时间注入幅值为 3 A 的偏磁电流, 发生区外单相金属性故障

采用 4.2 节所构建的仿真模型, 假设注入偏磁电流 $i_0 = 3 \text{ A}$, 且直流偏磁发生时间与故障发生时间间隔较长, 此时分别采用传统方案与改进判据对故障进行分析, 具体结果如下所述。

同上述仿真流程, 首先获取故障后 3 个工频周波内的相空间轨迹如图 18 所示。

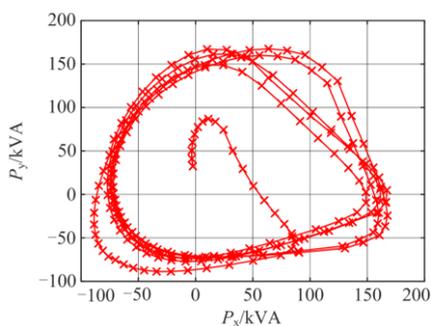
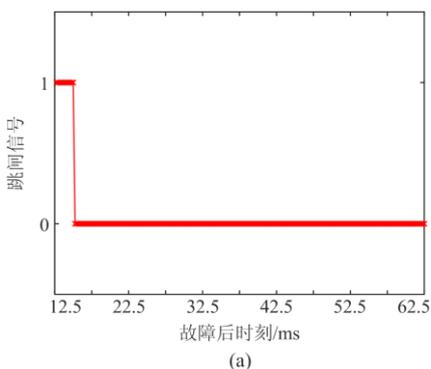


图 18 针对瞬时功率的相空间轨迹重构图(场景③)

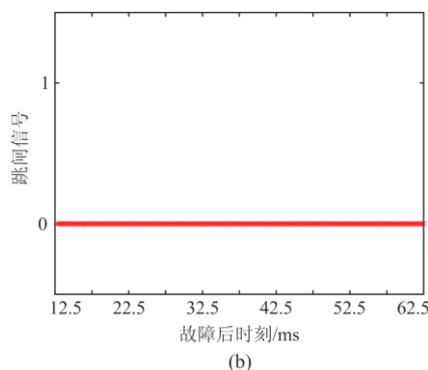
Fig. 18 Phase space trajectory remapping for instantaneous power (Scenario ③)

需要注意的是, 尽管偏磁电流仅有 3 A, 但由于存在时间较长, 累积效应的存在使得故障前 CT 已经工作在了近饱和点的局部磁滞回环中, 进而使得故障后第一个周波电流饱和时间大幅缩短、CT 进入深度饱和区域。因此, 故障后前 10 个(2.5 ms)相空间轨迹重心点均落在第 III 象限, 保护方案 1 将误动, 第 11 个点及以后的相空间轨迹重心点均未落在第 III 象限, 保护方案 2 将可靠不动作。保护方案 1 和保护方案 2 的动作情况分别如图 19(a)和图 19(b)所示。

(2) 短时间注入幅值为 50 A 的偏磁电流, 发生区外单相金属性故障



(a)



(b)

图 19 场景③下变压器保护的保护动作情况

Fig. 19 Protection action of transformer protection in Scenario ③

在场景③的基础上, 保持仿真模型不变, 增大偏磁电流幅值至 50 A, 其余流程同(1)所述。故障后 3 个周波内的相空间轨迹如图 20 所示。

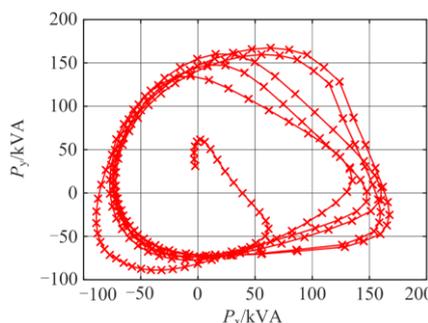


图 20 针对瞬时功率的相空间轨迹重构图(场景④)

Fig. 20 Phase space trajectory remapping for instantaneous power (Scenario ④)

此时, CT 迅速进入深度饱和区域, 导致故障后第一个周波计算得到的相空间轨迹周期重心向第 III 象限发生了显著偏移。计算可得, 发生区外故障后第一个完整轨迹周期的轨迹包络图形重心为 $(-16.6 \text{ kVA}, -23.3 \text{ kVA})$, 故障后保护动作情况如图 21 所示, 故障发生后的前 14 个相空间轨迹重心点均落在第 III 象限, 因此保护方案 1 将误动; 然而, 从第 15 个点及以后相空间轨迹重心均未落在第 III 象限, 保护方案 2 将可靠不动作。保护方案 1 和保护方案 2 的动作情况分别如图 21(a)和图 21(b)所示。

4.4 基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案的可行性分析

4.3 节分析了改进方案的可靠性, 接着分析该方案的可行性。正如 3.2 节分析可知, 所提方案通过适当延后数据信息采集时间, 躲过最严重饱和时刻, 牺牲保护的速动性来换取保护的可靠性。除此之外, 所提保护改进判据还在流程初期对直流偏磁电流进行了检测, 该检测流程与信息传递时间均发生在在故

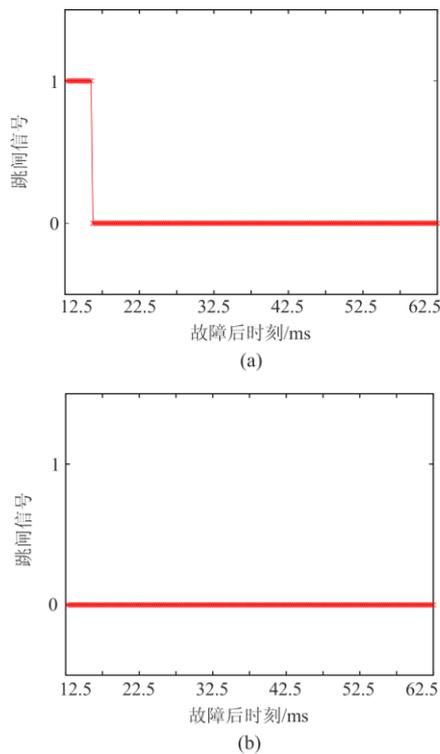


图 21 场景④下变压器保护的保护动作情况

Fig. 21 Protection action of transformer protection in Scenario ④

障之后, 同样将对保护的速动性产生不利影响。综上, 所提保护方案的可行性需进一步论证。

首先, 探讨偏磁电流检测对速动性的影响。研究表明, 直流检测所需时间主要由通信时延和传输时间两部分构成。目前变电站一般采用光纤通信作为传输手段, 其通信时延约为 1 ms。当两台设备通过光纤通道进行通信时, 其来回的时长不会超过 4 ms, 即使考虑 2 倍的通信时延, 保护装置从发出通信请求到最终收到偏磁电流信息的时间间隔也不会超过 8 ms。此外, 传输时间仅与传输包大小、传输带宽等因素有关, 考虑到传输信号只需要包含单个用于判别偏磁状态的字符, 传输包大小、传输带宽对传输时间的影响可忽略不计。综上, 直流检测所需时间约为 8 ms。

在完成偏磁电流判断后, 若判断无偏磁电流, 为尽可能兼顾保护的可靠性及速动性, 所提保护判据按照原先设计无延时地快速动作。考虑到直流偏磁现象发生概率整体较低, 且一般持续时间也不超过数个小时, 因此所提改进方案能保证在绝大部分时间下变压器主保护能无延时地快速动作。

其次, 还需讨论延迟采样点数目 N_{set} 对保护速动性的影响。理论上, N_{set} 应综合考虑偏磁电流的

持续时间、幅值以及 CT 饱和程度的影响。但结合实际来看, 一方面, 偏磁电流的幅值、持续时间与众多因素有关, 无法进行人为预测, 另一方面, CT 饱和程度也与自身性质、使用时间等因素有关, 两者均难以用简单的函数进行定量描述, 因此当前无法真正实现延迟采样点数目 N_{set} 的定量化计算。为此, 本文针对 N_{set} 的取值拟采用遍历仿真、保守估值的方法, 遍历不同条件下的海量仿真结果, 寻找能满足多种恶劣偏磁电流场景下保护可靠性的延迟采样点数目最小值 N_{min} 。结果发现, 即使在最恶劣的偏磁场景下, 故障后相空间轨迹识别判据连续误判的点的数目不会超过 $N_{\text{min}} = 18$ 个。进一步地, 引入可靠系数概念, 并取值 $K_{\text{rel}} = 1.2$, 根据 $N_{\text{set}} > K_{\text{rel}} N_{\text{min}}$, 可求得延迟采样点数目满足 $N_{\text{set}} > 21$ 。此时, 保护延后约 5 ms。

综上可知, 所提新保护方案的总动作时间约为 13 ms, 远小于国标《继电保护和安全自动装置装置技术规程》(GB/T 14285-2016)和电力行业标表《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》(DL/T 584-2007)中规定的速动性门槛值。

5 结论

本文理论分析了直流偏磁对 CT 饱和的影响, 并由此揭示了直流偏磁诱发继电保护失效的机理。进一步地, 提出了一种基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案, 兼顾保护的可靠性及速动性。最后, 利用 PSCAD 软件对所提改进方案进行仿真验证, 形成了以下结论:

1) 由于直流偏磁对保护用 CT 测量的不利影响, 以纵联电流差动保护、距离纵联保护为代表的线路保护与以变压器差动保护为代表的变压器保护均会失去可靠性, 对电网的安全运行造成严重威胁。

2) 在传统保护方案基础上, 进一步考虑继电保护类型、发生故障种类、偏磁影响程度等多方面因素, 设计了一种基于相空间轨迹识别的继电保护改进方案。与传统方案相比, 所提改进方案能更全面地应对不同场景下的保护失效问题, 具备普适性。

3) 通过定量化分析可知, 所提改进保护方案的总动作时间约为 13 ms, 其数值上小于国家标准规定的速动性门槛值, 因此所提保护改进方案在满足速动性的前提下提高了保护的可靠性, 具有显著的优越性。

参考文献

- [1] ETEMADI A H, REZAEI-ZARE A. Optimal placement of GIC blocking devices for geomagnetic disturbance

- mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2753-2762.
- [2] 刘鹏, 郭倩雯, 杨铭, 等. 抗直流偏磁的变压器中性点接地方式探讨[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 794-799.
LIU Peng, GUO Qianwen, YANG Ming, et al. Discussion about neutral point connection mode of transformer to inhibit DC bias[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 794-799.
- [3] 杨娜, 陈煜, 潘卓洪, 等. 准东—皖南±1100 kV 特高压直流输电工程受端电网的直流偏磁影响预测及治理[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 380-386.
YANG Na, CHEN Yu, PAN Zhuohong, et al. Influence prediction and suppression research of DC bias in Eastern Junggar-Southern Anhui ±1100 kV UHVDC receiving-end grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 380-386.
- [4] 李冰, 王泽忠, 刘恪, 等. 特高压变压器直流偏磁对绕组电流的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1422-1431.
LI Bing, WANG Zezhong, LIU Ke, et al. Research on winding current of UHV transformer under DC-bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1422-1431.
- [5] 翁汉琮, 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.
- [6] 赵小军, 杜雨彤, 刘洋, 等. 应用磁-机械耦合场频域解法的铁芯直流偏磁振动特性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1216-1225.
ZHAO Xiaojun, DU Yutong, LIU Yang, et al. Vibration characteristics analysis of iron core under dc-biased condition by solving coupled magneto-mechanical field in frequency-domain[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1216-1225.
- [7] 王佳音, 白保东, 刘宏亮, 等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 56-61.
WANG Jiayin, BAI Baodong, LIU Hongliang, et al. Research on vibration and noise of transformers under DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56-61.
- [8] CHEN D, HOU B, FENG Z, et al. Study of magnetostriction influence of electrical sheet steel under different DC biases[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(2): 1-5.
- [9] 马书民, 戎子睿, 林湘宁, 等. 计及多类装置协同的直流偏磁治理设备全局优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4387-4399, 4720.
MA Shumin, RONG Zirui, LIN Xiangning, et al. Study on the global optimal configuration of DC bias equipment considering the cooperation of multiple devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4387-4399, 4720.
- [10] 刘春明, 黄彩臣, 潘明明, 等. 抑制变压器直流偏磁的电容隔直装置优化配置[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2308-2314.
LIU Chunming, HUANG Caichen, PAN Mingming, et al. Optimal configuration of capacitor blocking devices for suppressing DC bias in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2308-2314.
- [11] 戎子睿, 马书民, 林湘宁, 等. 一种多接地极主动互联及隔直装置协同的直流偏磁治理策略[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3453-3462.
RONG Zirui, MA Shumin, LIN Xiangning, et al. A DC magnetic bias control strategy based on active interconnection of multi-grounding poles and coordination of straightening device[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3453-3462.
- [12] 黄义隆, 张波, 国建宝, 等. 改善直流电流地中分布的接地极互联技术研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1338-1344.
HUANG Yilong, ZHANG Bo, GUO Jianbao, et al. Research on improving DC current distribution in earth by interconnecting DC grounding electrodes[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1338-1344.
- [13] 龙兵, 刘元琦, 汤怀收, 等. 基于多直流功率支援的直流偏磁治理策略[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 42-51.
LONG Bing, LIU Yuanqi, TANG Huaishou, et al. Suppression method of DC magnetic bias based on multi-DC power support[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 42-51.
- [14] 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. The influence of the transfer characteristics of the current transformer with DC bias on the differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 89-93.
- [15] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 地磁感应电流对电流互感器传变特性及差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 84-89.
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Influence of geomagnetic induced current on current transformer transmission characteristics and differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 84-89.
- [16] 陈佩璐. HVDC/GIC 引发的直流偏磁对差动保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

- CHEN Peilu. Research on the effects of DC magnetic bias caused by HVDC/GIC on differential protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [17] LI Z, WAN J, WANG P, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.
- [18] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121.
- [19] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.
- LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Current transformer characteristics under magnetic bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [20] 郑茂然, 王茂林, 张静伟, 等. 基于零模涌流波形相似度的零差保护 CT 极性校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 101-108.
- ZHENG Maoran, WANG Maolin, ZHANG Jingwei, et al. Zero difference protection CT polarity check method based on zero mode inrush current waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 101-108.
- [21] 张晓宇, 郑超, 莫品豪, 等. 直流偏磁对变压器保护的影响及直流偏磁保护改进[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 148-154.
- ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, et al. Influence of DC magnetic bias on transformer protection and improvement of DC magnetic bias protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 148-154.
- [22] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
- YUAN Yubo, LU Yuping, XU Yang, et al. The influence of current transformer local transient saturation on transformer differential protection during external fault removal and the countermeasures[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [23] 罗美玲, 国兴超, 于晓军, 等. 基于波形相关性分析的换流变压器零序差动保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 80-89.
- LUO Meiling, GUO Xingchao, YU Xiaojun, et al. Zero sequence differential protection scheme of converter transformer based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 80-89.
- [24] 翁汉琮, 陈皓, 万毅, 等. 基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 113-122.
- WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. New criterion for inrush current and fault differential current identification of transformer based on Babbitt coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 113-122.
- [25] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [26] 陈伟, 何家欢, 裴喜平. 基于相空间重构和卷积神经网络的电能质量扰动分类[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 87-93.
- CHEN Wei, HE Jiahuan, PEI Xiping. Power quality disturbance classification based on phase space reconstruction and convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 87-93.
- [27] 李自强, 魏磊, 韩大鹏, 等. 基于相空间重构的高压断路器机械故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 129-135.
- LI Ziqiang, WEI Lei, HAN Dapeng, et al. Research on mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on phase space reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 129-135.
- [28] 金能, 戎子睿, 林湘宁, 等. 基于故障分量瞬时功率相空间轨迹识别的线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2702-2713.
- JIN Neng, RONG Zirui, LIN Xiangning, et al. New principle of line longitudinal protection based on phase space trajectory identification of fault component instantaneous power[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2702-2713.
- [29] 戎子睿, 林湘宁, 金能, 等. 基于相空间轨迹识别和多判据融合的变压器保护新策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1924-1938.
- RONG Zirui, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. New transformer protection strategy based on phase-space trajectory recognition and multi-criteria fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1924-1938.
- [30] 李敏, 靳绍平, 宋宏天, 等. 直流分量下常规 CT 和抗直流 CT 计量性能对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 154-160.
- LI Min, JIN Shaoping, SONG Hongtian, et al. Comparison of measurement performance of conventional CT and anti-DC CT in DC component[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 154-160.

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-11-03

作者简介:

马书民(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流系统保护与控制; E-mail: 1007057798@qq.com

戎子睿(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

林湘宁(1970—), 男, 二级教授, 博士生导师, 研究方

向为电力系统保护与控制、新能源发电等。

(编辑 葛艳娜)