

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191568

基于零模涌流波形相似度的零差保护 CT 极性校验方法

郑茂然¹, 王茂林², 张静伟¹, 尹项根², 张弛¹, 陈朝晖¹, 高永强¹

(1. 南方电网有限责任公司电力调度与控制中心, 广东 广州 510623;

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 武汉 430074)

摘要: 由于变压器正常运行时无零序电流, 零差保护回路 CT(变压器 Y 侧)存在极性校验的难题。传统极性校验方法需要利用负荷电流, 存在应用局限。为此, 提出了基于零模涌流的零差保护 CT 极性无负荷校验方法。该方法利用变压器空载合闸励磁涌流的零模分量, 通过计算 Y 侧自产与中性点零模涌流的波形相似度, 采取“假设-检验”的方式, 遍历所有可能的极性错误情况, 实现零差保护 CT 极性正确性的校验, 并引入欧氏距离以进一步提高方法对极端涌流情况的适应性。基于 PSCAD/EMTDC4.6 和 Matlab 对此方法进行了仿真分析, 并利用南方电网某 500 kV 主变空载合闸涌流录波数据进行了验证, 结果表明该方法能在无负荷情况下可靠识别零差保护二次回路 CT 极性错误类型, 有效防止零差保护误动。

关键词: 变压器; 零差保护; 极性校验; 零模涌流; 波形相似度

CT polarity checking method of zero-sequence differential protection based on the similarity of inrush

ZHENG Maoran¹, WANG Maolin², ZHANG Jingwei¹, YIN Xianggen², ZHANG Chi¹, CHEN Zhaohui¹, GAO Yongqiang¹

(1. Electric Power Dispatching Control Center of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: The polarity checking of zero-sequence differential protection (Y side CT of transformer) is difficult because there is no zero-sequence current in the normal operation of the power system. Research shows that the traditional method requires load current, which can not be applied to the scene of no load. To solve this problem, a new method is proposed. The method uses the zero-mode component of inrush current generated by no-load closing, and calculates the waveform similarity of self-produced zero-sequence current and neutral point current at the Y side, adopts the “hypothesis-test” method, traverses all possible polarity error cases, and realizes the CT polarity calibration of zero-sequence differential protection. To improve the adaptability of this method in extreme inrush conditions, the Euclidean distance is introduced. The proposed method is simulated with PSCAD/EMTDC4.6 and Matlab, and verified by the on-site recording data of a 500 kV transformer of the China Southern Power Grid. The results show that the proposed method can identify CT polarity error type of zero-sequence differential protection without load current, and can effectively prevent mis-operation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 000000KK52180016).

Key words: transformer; zero-sequence differential protection; polarity checking; zero-mode inrush current; waveform similarity

0 引言

由于变压器零差保护对 Y 侧绕组接地故障灵敏

度高、不受励磁涌流影响和速动性好等特点, 广泛应用于超/特高压变压器中, 其正确动作与否对电网安全稳定运行有重要意义^[1-3]。而由于电网正常运行时无零序电流, 导致零差保护难以进行 CT 极性校验, 存在较大误动风险^[4-5]。

为此, 文献[6-9]对零差保护存在的极性校验问

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0900600); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(000000KK52180016)

题进行了研究。其中，文献[6]提出可以利用人工接地产生的零序电流对零差保护 CT 极性进行校验；由于机组在启动过程中须进行发变组短路试验，该方法利用主变高压侧区外单相接地短路试验产生的零序电流进行校验。《继电保护和电网安全自动装置检验规程 DL/T 995-2006》(以下简称“规程”)规定，继电保护电流、电压二次回路变更时应补充极性校验工作，故在主变 Y 侧 CT 检修、更换或者二次回路接线变动后，须重新进行短路试验以完成极性校验，造成此方法适用性较低。文献[7]则提出可以利用区外故障产生的穿越性零序电流对零差保护 CT 极性进行校验；这种方法先将零差保护退出运行，待变压器经历第一次区外接地故障时，利用零序电流的故障录波数据对零差保护进行极性校验，待校验正确后再投入。这种方法的缺点是零差保护不能随主变一起投运，须一直等待区外接地故障到来并校验极性正确后才能投入，存在零差保护空窗期，导致主变保护性能降低。文献[8-9]则利用空投涌流的零序分量对零差保护 CT 极性进行校验，通过比较自产零序电流与中性点零序电流间相位差的方式实现。这种方法只能判断中性点 CT 极性接反的情况，无法判断 Y 侧各相 CT 极性是否正确，仅适用于 Y 侧各相 CT 极性已进行带负荷校验的情况，而在新建厂站、终端变电站等主变启动投运过程中，往往难以组织负荷电流对 Y 侧各相 CT 极性进行校验。

文献[10-12]对变压器零模涌流进行了研究，零模涌流指的是三相电流瞬时值之和，拥有丰富的频率含量，其工频基波即为零序电流；与零序电流相比，零模涌流幅值更大，更便于现场测量和极性校验。对于零差保护，空投零模涌流是穿越性电流，任一 CT 极性错误均会影响零模涌流二次值，故可基于两侧电流波形相似性对其错误类型进行识别。波形相似性的度量方法可分为相似度量与距离度量两类，其中有余弦相似度算法^[13]、Hausdorff 距离算法^[14-15]、欧氏距离算法^[16]等。目前电力系统相关研究中，波形相似性原理主要应用于新型差动保护判据构造和故障定位方面^[13,15-16]，尚无应用于 CT 极性校验方面的参考资料。

综上所述，不论是基于区外故障、人为短路试验还是空载合闸，零差保护极性校验首先需要获取足够大的零序电流；此外，现有校验方法以相位比较为主，无法识别所有 CT 极性错误类型，迫切需要一种能同时校验 Y 侧所有 CT 极性并且不需要负荷电流的校验方法。

为此，本文利用空载合闸产生的零模涌流，提

出了基于波形相似性原理的零差保护 CT 极性校验方法。通过计算变压器空载合闸时 Y 侧自产零模涌流与中性点零模涌流的波形相似度，并基于本文提出的“假设-检验”方法进行判断，能同时对 Y 侧所有 CT 极性进行校验，并能准确识别错误类型。

基于 PSCAD/EMTDC4.6 和 Matlab 对此方法进行了仿真分析，并利用南方电网某 500 kV 主变空载合闸涌流录波数据进行了验证。结果表明，此方法能够在无负荷情况下快速准确地完成零差保护 CT 极性校验，从根本上解决了变压器零差保护可靠性低的问题。

1 零差保护工程应用概况及问题

以南瑞继保 PCS-985TW 型为例，其零差保护判据为差电流形式，以电流流入变压器 Y 侧为正方向，其 CT 减极性接线原理如图 1 所示。主变正常运行时自产零序电流和中性点外接零序电流大小相位均相同，零序差流为 0，其保护判据为

$$I_{0d} = 3 \left| \dot{I}_{0p} - \dot{I}_{0n} \right| > I_{set} \quad (1)$$

实际应用中通常采用比例制动判据， I_{set} 为浮动门槛值，但所有判据均建立在 Y 侧 A、B、C 三相 CT 与中性点 CT 相对极性正确的前提下。

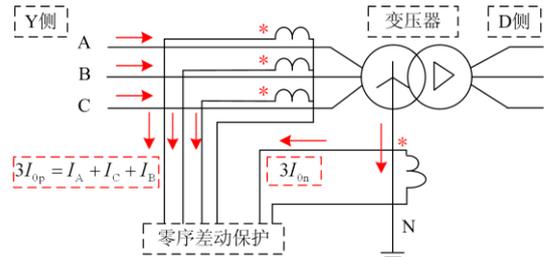


图 1 零差保护减极性接线原理图

Fig. 1 Schematic diagram of zero-sequence differential protection

1.1 配置零差保护的必要性

大型变压器故障统计表明，对于超/特高压自耦变或换流变，Y 侧绕组接地故障率远大于相间故障^[4]。普通纵差保护为保证在区外单相接地故障时不误动，其差动电流不含零序电流，导致 Y 侧绕组接地故障时灵敏度降低。此外，由于传统纵差保护必须考虑躲过励磁涌流，需采用二次谐波制动、间断角识别等制动措施，其动作速度慢和可靠性差的问题日益凸出^[17-18]。

而零差保护在原理上就不受励磁涌流影响，可快速切除超/特高压自耦变、换流变 Y 侧绕组接地故障。因此，大型变压器在配置传统纵差保护的同时须配置并投入零差保护。

1.2 影响零差保护可靠性的关键因素

文献[19-20]对零差保护可靠性进行了研究, 分析了区外故障时零差保护的各类误动现象, 并提出了许多新判据, 但却都忽略了这些新判据也必须建立在零差保护 CT 极性正确的前提下。由于零差保护本质仍是差动保护, 其差动回路两侧 CT 极性正确与否会引起零序差流的剧变, 进而影响零差保护的正确动作。因此, CT 极性是影响零差保护可靠性的关键因素。

综上所述, 由于变压器在电力系统中占据重要地位, 随着特高压交直流混联大电网的发展, 其保护快速性、可靠性要求也越来越高。虽然变压器零差保护范围不及纵差保护, 但零差保护快速性好且灵敏度高等优点是对常规纵差保护的重要补充, 其关键是解决零差保护存在的极性校验问题。

2 基于零模涌流波形相似度的极性校验

对于图 1 所示减极性接线的变压器零差保护, 空投产生的 Y 侧自产零模涌流 I_{0p} 与中性点外接零模涌流 I_{0n} 本质上是同一电流, 其波形应一致, 即使考虑 CT 传变特性, 其波形也应是高度相似的。因此本文提出了一种基于 I_{0p} 和 I_{0n} 波形相似度的零差保护无负荷极性校验方法。此方法不需要提前带负荷校验 Y 侧各相 CT, 适用于所有 CT 极性均未校验的情况。

2.1 波形相似性原理

余弦相似度算法是基于向量空间中两个向量夹角的余弦值来衡量两组数据间的相似性, 其本质是从方向上衡量两组数据的差异, 如图 2 所示, 对应的余弦相似度计算公式为

$$S(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2) = \cos \theta = \frac{\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2}{\|\mathbf{V}_1\| \times \|\mathbf{V}_2\|} \quad (2)$$

此外, 欧氏距离算法是基于向量空间中各数据点间的绝对距离 $dist(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2)$ 来反映两组数据间的相

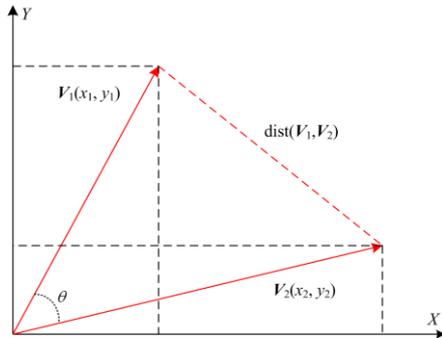


图 2 波形相似度原理示意图(二维向量空间)

Fig. 2 Similarity calculation of two dimensional vector space

似性, 如图 2 所示, 其值跟各数据点在各特征维度上的数值直接相关, 可反映两组数据在整体数值上的差异, 其计算公式为

$$F(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2) = \|\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2\| \quad (3)$$

对于实际电力系统中保护装置获取的两组波形数据 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} , 设其采样点数均为 m , 则两组数据各有 m 个数据点, 将上述二维向量空间拓展到 m 维, 即可得到实用的波形相似度计算公式为

$$\begin{cases} S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i \times y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}} \\ F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2} \end{cases} \quad (4)$$

由上述原理分析可知, $S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 的值有: 1、-1、1~-1 三种, 分别对应于 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 向量夹角为 0° 、 180° 、 $0 \sim 180^\circ$ 三种情况, 而 $F(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 的值恒大于等于 0, 取决于实际情况。

2.2 极性校验判据构造

由前述 I_{0p} 与 I_{0n} 的相对关系可知, 极性正确时两者余弦相似度 S 应为 1、欧氏距离 F 应为 0。由于保护级 CT 测量误差最大不得超过 10%^[21], 基于上述特征, 考虑噪声后设置基于 S 的判据为

$$S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) > 0.9 \quad (5)$$

同时, 考虑测量误差导致的零序不平衡量为 $F_d = \|0.1I_{0n}\|$, 可设置基于 F 的判据为

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < \|0.1I_{0n}\| \quad (6)$$

两者与逻辑形成极性正确时的最终判据为

$$S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) > 0.9 \ \&\& \ F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < \|0.1I_{0n}\| \quad (7)$$

极性错误时, 先考虑仅中性点 CT 极性接反(等效于 Y 侧 A、B、C 三相 CT 极性均接反), 此时 Y 侧自产与中性点外接零序电流相位相差 180° , 此时可不考虑 F , 设置基于 S 的判据为

$$S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) < -0.9 \quad (8)$$

除开上述两类, 其余极性错误情况设为非常规极性错误集合, 设置判据为

$$|S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})| \leq 0.9 \ \text{or} \ F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq \|0.1I_{0n}\| \quad (9)$$

由于 Y 侧一共有 A、B、C 及中性点 N 共计四个 CT, 故共有 14 种极性错误情况。

$$C_4^1 + C_4^2 + C_4^3 = 14 \quad (10)$$

在式(8)排除中性点 CT 接反与 Y 侧三相 CT 同时接反两种情况后, 还有 12 种非常规极性错误情况, 但由于 AB 接反等同于 CN 接反, 以此类推简化后的非常规极性错误集合只有以下六种情况。

$$S_{\max} = \max \{S_A, S_B, S_C, S_{AN}, S_{BN}, S_{CN}\} \quad (11)$$

$$F_m = \{F_A, F_B, F_C, F_{AN}, F_{BN}, F_{CN}\} \quad (12)$$

式中, $S_A, S_B, S_C, S_{AN}, S_{BN}, S_{CN}$ 和 $F_A, F_B, F_C, F_{AN}, F_{BN}, F_{CN}$ 表示假设对应相 CT 极性接反, 对其 CT 电流采样值进行取反纠正后, 重新计算得到的余弦相似度 S 和欧氏距离 F , 其中 S_{\max} 为余弦相似度的最大值, 对应的欧氏距离为 F_m 。

2.3 极性校验方法实现

本文所提校验方法的流程如图 3 所示, 由极性正确性检测、极性错误类型识别两部分组成。

其核心思想是“假设-检验”, 在采集到两侧零模涌流之后, 根据式(7)所示判据, 先判断极性是否正确; 如果错误再假设 CT 极性接反类型, 针对不同的 CT 极性接反情况对相应二次电流相位进行取反纠正, 再求取纠正后的两侧零模涌流波形相似度; 遍历六种非常规极性错误情况后可得 S_{\max} 与对应 F_m , 判断其是否满足式(7)所示判据, 判断正确后对应的 CT 相别即为极性错误相, 进而显示对应极性错误类型并告警。

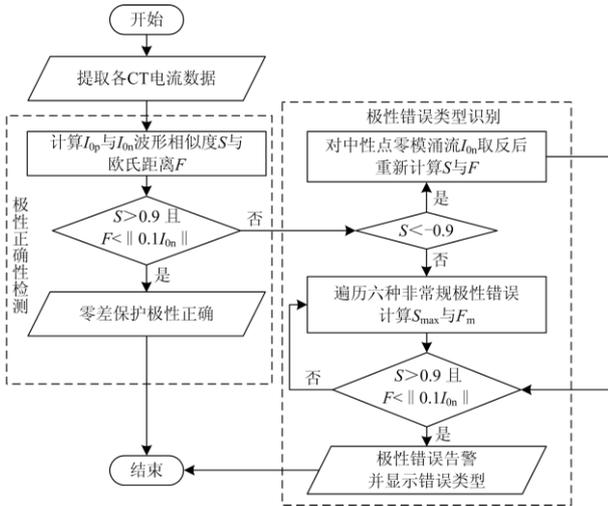


图 3 基于波形相似度的零差保护自校验算法框图

Fig. 3 Logic block diagram of the algorithm proposed in this paper

3 仿真分析

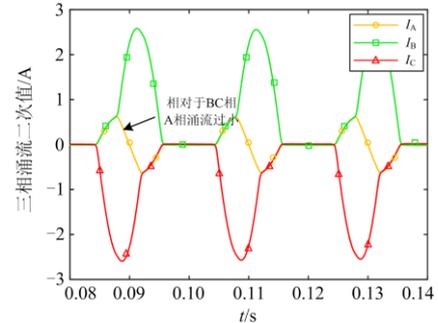
为验证上述理论正确性, 并全面分析所提方法对空载合闸励磁涌流的适应性, 本文基于可模拟变压器剩磁的 PSCAD/EMTDC 4.6 版本建立了变压器空载合闸仿真系统; 其中以容量为 240 MVA, 额定电压变比为 220/10.5 kV 的 Yn/d11 双绕组变压器为原型; 电流互感器模型选用 Jiles-Atherton 模型以模拟 P 级 CT 暂态过程^[22], 高压侧电流变比为 1600/1 A, 中性点电流变比为 600/1 A。

3.1 极端涌流情况

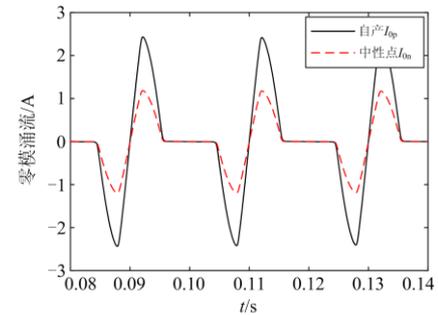
1) 一相涌流过小时

由于空载合闸励磁涌流具有很强的随机性, 可能存在一相涌流很小, 同时另两相涌流相对较大的极端情况。以不考虑剩磁且在 A 相 90° 时合闸为例 (以下合闸角均基于 A 相), 由于在 A 相电压顶点、磁通过零点合闸, 此时的 A 相励磁涌流相对于 B、C 相涌流较小, 如图 4(a)所示; 这使得其反相并不会给自产零模涌流带来很大的相位差, 仅在幅值上有一定影响, 如图 4(b)所示。

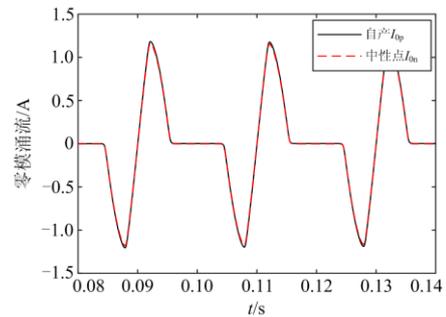
此时若恰好出现 A 相 CT 极性错误, 求得余弦相似度 S 约等于 1, 与极性正确时的 S 相同, 如图 4(c)所示, 容易误判。但此时的 F 为 15.043 8 远大于此时的定值 1.687 9; 而对 A 相 CT 电流进行取反验证时, F 为 0.075 7 远小于此时的定值, 故可正确识别此极端情况。



(a) 三相励磁涌流



(b) A相CT极性错误时



(c) A相极性正确时

图 4 一相涌流过小时(剩磁 0,0,0; 合闸角 90°)

Fig. 4 Extreme case 1 (remanence 0,0,0, closing angle 90°)

2) 一相涌流过大时

同样的, 也存在一相涌流很大, 同时另两相涌流相对较小的极端情况。以剩磁(0.8, -0.8, 0)为例, 在合闸角 180° 时将出现 C 相涌流相对于 A、B 相过大的情况, 如图 5(a)所示; 此时的自产零模涌流受 C 相涌流影响最大, 若恰好出现 C 相 CT 极性错误如图 5(b)所示, 自产零模涌流相位将反转 180°。

若仅基于余弦相似度 S 进行识别, 此时的 S 约等于 -1, 容易误判为是中性点接反如图 5(c)所示; 在对中性点电流进行取反验证时, 求得欧氏距离 F 为 9.80 远大于此时的定值 0.45; 而对 C 相 CT 电流进行取反验证时, F 为 0.18 远小于此时的定值 0.45, 故也可正确识别此极端情况。

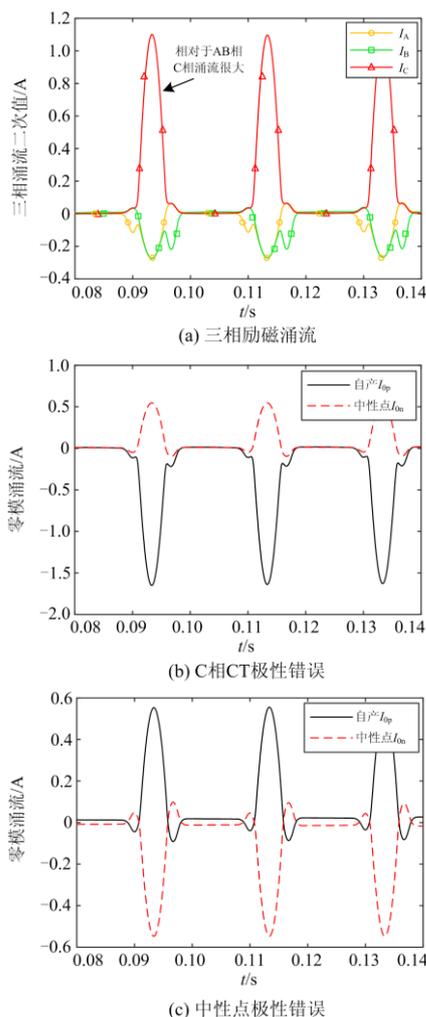


图5 一相涌流过大时(剩磁 0.8, -0.8, 0; 合闸角 180°)

Fig. 5 Extreme case 2 (remanence 0.8, -0.8, 0; closing angle 180°)

3.2 适应性分析

为分析本文所提方法的适应性, 设定了三种典

型剩磁分布情况如表 1 所示。

表 1 三种变压器典型剩磁

Table 1 Typical remanence of three kinds of transformers

三相剩磁/p.u.	$Br-A$	$Br-B$	$Br-C$
剩磁分布 1	0	0	0
剩磁分布 2	0.5	-0.25	-0.25
剩磁分布 3	-0.7	0.35	0.35

在上述仿真环境下, 对三者进行合闸角分别为 0°~360° (每隔 30°) 的仿真。计算不同工况下 Y 侧自产与外接零模涌流的余弦相似度 S 与欧氏距离 F , 并利用本文所提方法进行极性校验, 结果如下。

1) 在极性正确时的仿真结果如图 6 所示, 可见 S 均分布于 1 附近, 而 F 则均分布于 0 附近, 与前述理论分析一致。

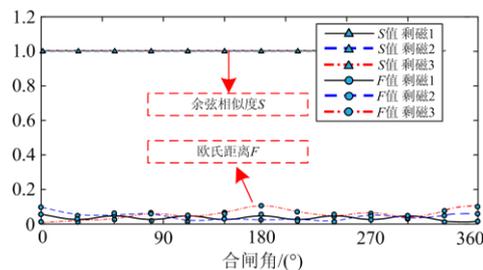


图 6 极性正确时不同涌流条件下的 S 与 F

Fig. 6 Similarity values under different closing angles when polarity is correct (S & F)

2) 在极性错误时, 不同剩磁下的不同极性错误类型仿真计算结果如图 7—图 9 所示。

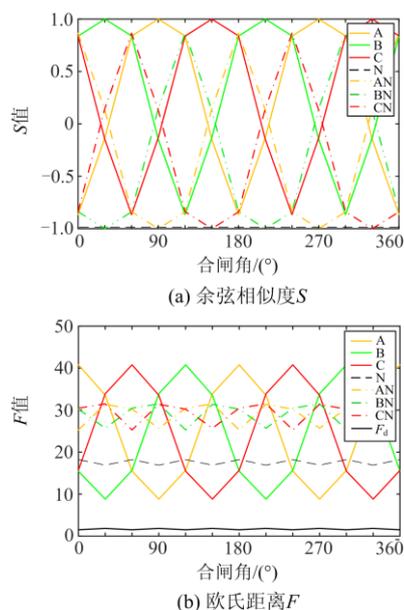


图 7 不同极性错误类型的计算结果(剩磁 1)

Fig. 7 Similarity value under different closing angles with

different polarity error types (remanence 1)

由上述仿真结果可见, 在不同剩磁与合闸角组合下, 极性错误时的 S 与 F 均关于 180° 合闸角呈对称性规律变化。其中, S 值在 -1 到 1 之间随合闸角变化; 对于不同的极性错误类型, 所有 F 值均远大于 F_d 值, 并且 F_d 值随着零模涌流大小自适应改变, 可识别所有极性错误类型。

综上所述, 基于本文提出的判据和方法对零差保护 CT 极性进行校验, 不仅能识别出所有 CT 极

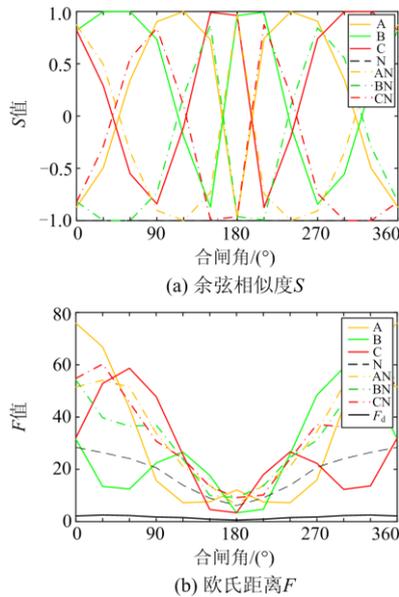


图 8 不同极性错误类型的计算结果(剩磁 2)

Fig. 8 Similarity value under different closing angles with different polarity error types (remanence 2)

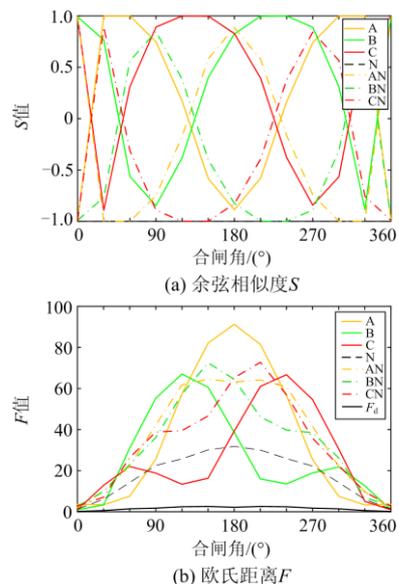


图 9 不同极性错误类型的计算结果(剩磁 3)

Fig. 9 Similarity value under different closing angles with

different polarity error types (remanence 3)

性错误类型, 并且对涌流随机性有很强的适应性。

4 录波应用

利用靖海电厂#1号主变启动投运时的涌流录波数据对本文所提方法进行了验证, 该主变的空载合闸励磁涌流录波数据如图 10 所示, 该主变高压侧 CT 变比为 2500/1, 中性点 CT 变比为 1000/1, 波形采样率为 10 kHz。由录波得到其高压侧自产零模涌流 I_{0p} 与中性点外接零模涌流 I_{0n} 如图 11 所示(已进行 CT 变比换算), 采用波形回放的方式模拟实际校验, 分别采用传统极性校验方法与本文所提无负荷极性校验方法进行校验, 结果分别如图 12、图 13 所示。

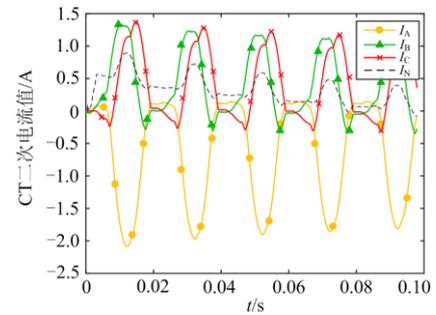


图 10 靖海电厂#1主变空充录波波形

Fig. 10 Wave recording of a main transformer with no load closing

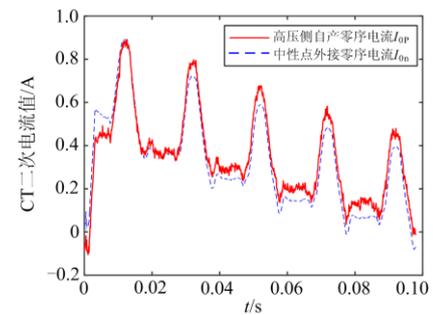


图 11 由录波计算所得 I_{0p} 与 I_{0n}

Fig. 11 I_{0p} calculated by recording data and I_{0n}

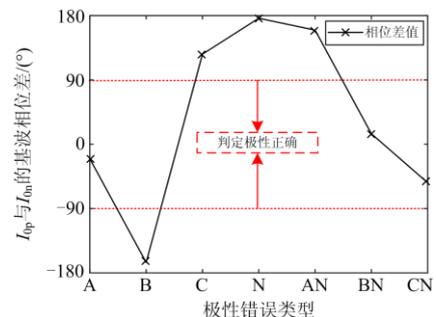


图 12 I_{0p} 与 I_{0n} 的基波相位差

图 12 传统极性校验方法结果

Fig. 12 Results of traditional polarity checking method

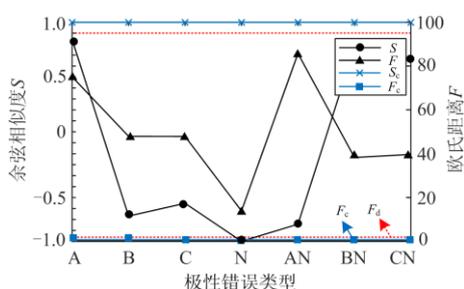


图 13 本文所提无负荷极性校验方法结果

Fig. 13 Results of no-load polarity checking method proposed in this paper

由图 12 可见, 传统基于相位差的极性校验方法仅能正确识别中性点 CT 极性错误的情况, 其余极性错误类型无法识别, 有时甚至会误判为极性正确。而由图 13 可见, 本文所提校验方法得到的余弦相似度 S 和欧氏距离 F 均落在极性错误区间内; 通过“假设-检验”的方式识别出对应错误类型并纠正后, 所得纠正值 S_c 和 F_c 均落在极性正确区间内, 能对所有 CT 极性错误类型进行准确识别。

5 结论

本文针对变压器零差保护存在的 CT 极性校验问题, 从零差保护原理出发, 论述了配置零差保护的必要性, 分析了 CT 极性校验对零差保护可靠性的影响, 指出了目前工程应用中实际校验方法存在的问题和不足, 并基于波形相似性原理, 提出了一种新的无负荷极性校验方法, 并通过仿真和录波验证了该方法。现将该方法总结如下:

1) 方法的核心原理是利用变压器空载合闸产生的零模涌流, 基于 Y 侧 CT 自产与中性点 CT 外接零模涌流的余弦相似度 S 和欧氏距离 F , 采用“假设-纠正-检验”的方式进行 CT 极性校验。

2) 方法的优点是简单可靠, 仅需进行空投操作, 不需要进行带负荷测试, 可应用于 Y 侧三相 CT 更换或主变启动投运等 Y 侧所有 CT 极性均未校验的场合, 能使零差保护在第一时间可靠投运。

3) 经仿真分析和录波验证表明, 此方法对于不同剩磁分布、不同合闸角下的励磁涌流具有良好的适应性, 具有较强的实用价值。

参考文献

[1] 翁汉琨, 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.

[2] 卓枕警. 变压器零差保护相关技术探讨及主变跳闸分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 98-99.

ZHUO Zhenjing. Discussion on related technologies of transformer zero-sequence differential protection and analysis of transformer's tripping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 98-99.

[3] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.

[4] 王维俭. 再谈 220 kV 及以上大型变压器装设零序差动保护的必要性[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 1-5.

WANG Weijian. Necessity of installing zero-sequence differential protection for large transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 1-5.

[5] 王冰清, 李本瑜, 宋晓亮. 基于瞬时功率理论的变压器 CT 接线校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 173-179.

WANG Bingqing, LI Benyu, SONG Xiaoliang. Verification method for transformer CT wiring based on instantaneous power theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 173-179.

[6] 宋梦琼, 黄娜, 彭宇, 等. 基于人工接地的零序差动电流极性校验方法[J]. 湖北电力, 2018, 42(6): 12-15.

SONG Mengqiong, HUANG Na, PENG Yu, et al. A method of zero-sequence differential protection TA polarity examine based on artificial earth fault[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(6): 12-15.

[7] 李兴, 郭卫民. 西门子 7UT612 装置零序差动保护原理及 CT 极性整定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(18): 62-65, 78.

LI Xing, GUO Weimin. Principle of restricted earth fault protection and CT's polarity setting method of SIEMENS 7UT612[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(18): 62-65, 78.

[8] 李本瑜, 陈海龙, 刘志文, 等. 大型发变组保护 CT 极性 & 保护方向自动检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 100-105.

LI Benyu, CHEN Hailong, LIU Zhiwen, et al. Research on CT polarity and protection direction automatic detection technology for large generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 100-105.

[9] 陆明, 薛磊, 余江, 等. 变压器零序差动保护的分析和改进[J]. 南方电网技术, 2018, 12(10): 35-40.

- LU Ming, XUE Lei, YU Jiang, et al. Analysis and improvement of zero-sequence differential protection for transformer[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(10): 35-40.
- [10] 方榆冬, 徐习东, 朱炳铨. 变压器涌流对零序电流保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 115-118.
FANG Yudong, XU Xidong, ZHU Bingquan. Influence of transformer inrush on zero-sequence current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 115-118.
- [11] 尹项根, 曹文斌, 潘远林, 等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 1-11.
YIN Xianggen, CAO Wenbin, PAN Yuanlin, et al. Inrush current characteristic of high-impedance transformers and its impact on protective relays[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 1-11.
- [12] 郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴, 等. 高压内置型变压器空投导致零序电流保护误动分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 164-170.
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing, et al. Analysis and measures of zero sequence current protection malfunction caused by no-load high-voltage built-in transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 164-170.
- [13] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的新能源场站 T 接型送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 111-124.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Cosine similarity based pilot protection of teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 111-124.
- [14] 郭倩雯, 莫文雄, 郑方晴. 一种基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 35-42.
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing. A new method of inrush current identification based on partial Hausdorff distance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 35-42.
- [15] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027.
- [16] 尤向阳, 葛笑寒, 吴萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 125-130.
YOU Xiangyang, GE Xiaohan, WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 125-130.
- [17] 王业, 陆于平, 蔡超, 等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 702-711.
WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 702-711.
- [18] 黄少锋, 李姗姗, 肖远清. 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 9-15.
HUANG Shaofeng, LI Shanshan, XIAO Yuanqing. A novel identification criterion for transformer inrush current based on decay rate of a periodic component[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 9-15.
- [19] 丁苏阳, 林湘宁, 翁汉琮, 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(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(1): 12-20.
- [20] 罗小莉, 赵安国, 郭晓冬. 新型变压器零序差动保护方案设计[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 119-121.
LUO Xiaoli, ZHAO Anguo, GUO Xiaodong. Design of new zero-sequence differential protection scheme for transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 119-121.
- [21] 何瑞文, 蔡泽祥, 王奕, 等. 空心线圈电流互感器传变特性及其对继电保护的适应性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1471-1476.
HE Ruiwen, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Analysis on transfer characteristics of air-core current transformer and its adaptability to relay protection[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1471-1476.
- [22] LUCAS J R, MCLAREN P G, KEERTHIPALA W W L, et al. Improved simulation models for current and voltage transformers in relay studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 152-159.

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-04-15

作者简介:

郑茂然(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: ranran_zheng@126.com

王茂林(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1690503618@qq.com

张静伟(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 姜新丽)