

电流互感器饱和检测的混合算法及其工程实现

郑茂然¹, 张志良², 栾 俐³, 张啸宇⁴

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东广州 510623; 2. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250061;

3. 国网山东省电力公司枣庄供电公司, 山东 枣庄 277000; 4. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 由于铁心的非线性励磁特性, 电力系统中配置的铁磁式电流互感器易受外部因素影响发生磁饱和, 从而导致一次电流无法正常传变, 这既可能引起保护装置对系统运行状态的错误判断, 也在一定程度上反映着电流互感器(TA)设备性能的变化。为准确识别TA饱和并深入分析设备发生饱和的规律, 对基于TA饱和的谐波与波形特征而提出的一种谐波比和分段积分法相结合的TA饱和检测混合算法进行了深入的探讨。并针对混合算法在实际工程应用中面临的多种技术问题, 结合现场的大量录波数据, 对混合算法进行改进以完善其工程实用性。算例分析表明, 改进后的混合算法既能有效识别TA饱和, 又利于利用录波数据快速准确收集TA饱和信息, 为评价TA性能及分析饱和和发生规律创造了条件。

关键词: 电流互感器; 饱和; 故障录波; 谐波比; 分段积分法

A hybrid algorithm for saturation detection of current transformer and its engineering realization

ZHENG Maoran¹, ZHANG Zhiliang², LUAN Li³, ZHANG Xiaoyu⁴

(1. Power Dispatching Contact Center, CSG, Guangzhou 510623, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company Jinan 253300, China; 3. State Grid Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277000, China; 4. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 253300, China)

Abstract: Due to the non-linear excitation characteristics of the core, the ferroelectric current transformer arranged in the power system is susceptible to magnetic saturation due to external factors, which leads to the inability of the primary current to pass normally. This may cause the wrong judgment of the operating condition of the protection device, But also to a certain extent, reflects the changes in TA equipment performance. In order to accurately identify TA saturation and analyze the law of equipment saturation, based on the preliminary work, based on the TA saturation of the harmonic and waveform characteristics, a harmonic ratio and segmentation integration method of TA saturation detection hybrid algorithm is discussed. Aiming at the various technical problems faced by the hybrid algorithm in the practical engineering application, combining with the large number of recorded data, the hybrid algorithm is improved to improve its engineering practicability. The results show that the improved hybrid algorithm can effectively recognize TA saturation and facilitate the rapid and accurate collection of TA saturation information by using the recorded data, which creates the conditions for evaluating TA performance and analyzing the law of saturation.

Key words: current transformer; saturation; fault recorder; harmonic ratio; segmentation integration method

0 引言

电流互感器作为一次侧和二次侧连接的枢纽, 是继电保护和监控系统感知系统运行状态的

重要组件。目前, 电力系统中配置的电流互感器大多是基于电磁感应的铁磁式互感器。由于铁心的非线性励磁特性, 流过大电流时电流互感器

将会发生饱和，从而使二次电流发生缺损和畸变，导致一次电流无法正常传变，这常常会引起保护装置对系统运行状态的错误判断。在实际工程中，这种情况时有发生，例如由于电流互感器饱和造成二次电流因畸变减小，会引起过电流保护的拒动作或动作延时；亦或是影响距离保护之间配合的选择性；电流互感器饱和对差动保护的影响则更为突出，保护区两侧电流互感器的饱和程度不同会引起差流增大，造成区外故障时差动保护误动作，严重影响电网的安全可靠运行。因此，对电流互感器饱和的检测显得尤为重要。

目前，国内外学者已经提出了多种检测电流互感器（TA）饱和的算法，包括时差法、比率制动、波形畸变特征识别及谐波分析等^[1-6]。然而，现有饱和检测算法常常会因为检测算法原理单一，无法兼顾实际工程中的各种复杂情况，从而不能满足实际需求，亦或是原理复杂，算法的合理性只适用于理想数据，因数据获取困难，检测算法无法应用到实际工程中。此外，目前大多数TA饱和检测的研究主要是服务于保护装置的正确动作，饱和检测算法作为防止保护误动作的判据之一内嵌于保护装置中。这种处理不利于饱和数据的收集，难以实现对饱和和信息的事后分析，错失了评价TA性能及挖掘饱和规律的机会。

本文首先分析TA饱和机理，归纳总结了TA饱和特征；随后提出了一种利用谐波分析与波形分段积分相结合的饱和检测算法，即先利用谐波的灵敏度高特性，通过计算谐波比初步筛选出疑似饱和的波形数据，随后利用饱和波形局部畸变明显的特征，采用波形分段积分原理，对疑似饱和的波形数据进行二次判别，最终达到准确检测TA饱和现象的目的；最后通过南网录波数据的测试对算法进行改进，大大提高了算法在实际工程中应用的准确性和可靠性。改进后的TA饱和检测算法能够实现由录波数据快速准确地提取TA饱和信息，从而为评价TA性能及挖掘饱和规律创造了条件。

1 电流互感器饱和机理及特征

1.1 电流互感饱和机理

引起TA饱和的原因有很多，如一次电流幅值过大、二次负载过大、一次系统时间常数过大、TA电流比选择不当以及铁心剩磁高等。但究其根本原因还是因为互感器铁心的非线性励磁特性。图1为简化后的TA等效电路模型，所有参数均已经归算至二次侧。

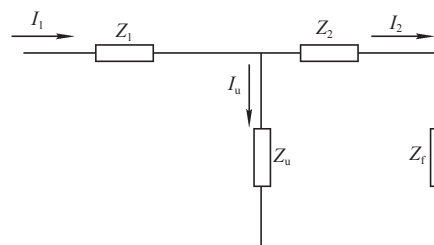


图1 TA等效电路
Fig.1 TA Equivalent circuit

由图1可得

$$I_1 = I_2 + I_u \quad (1)$$

$$U_2 = I_2(Z_2 + Z_f) \quad (2)$$

$$U_2 = Z_u I_u \quad (3)$$

图1中， Z_1 为TA的一次阻抗； Z_2 为TA的二次阻抗； Z_u 为TA的励磁阻抗； Z_f 为二次负载； I_1 为一次电流； I_2 为二次电流； I_u 为励磁电流。

电流互感器是一个具有铁心的非线性元件，在正常状态下，励磁阻抗很大且基本为常数，励磁电流很小，可以忽略不计，因此根据式（1）可知 I_2 近似与 I_1 相等，一次电流可以准确传变到二次侧，TA铁心工作在线性区。当TA一次侧通过较大的暂态电流时，由于暂态电流中的非周期分量大部分不能通过线圈传变到TA的二次侧，大量非周期分量流入励磁支路，导致TA铁心磁链积累，容易达到饱和磁密度之上，使铁心进入饱和区，铁心的磁导率迅速下降，励磁阻抗迅速减小，励磁电流增大，从而导致二次电流减小，TA无法正常传变一次电流，进而引起保护装置对系统运行状态的错误判断，严重影响电网的安全可靠运行。

1.2 电流互感器饱和特征

图2分别给出了TA未饱和时以及发生饱和时二次电流波形。

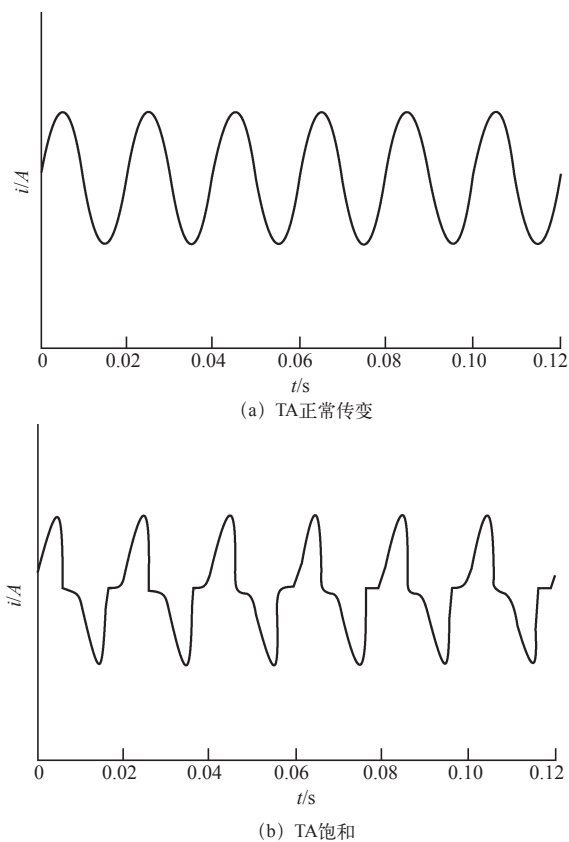


图2 TA二次电流波形

Fig.2 TA secondary current waveform

根据图2所示波形,可以得到TA饱和后的如下特征:

1) 故障发生与TA开始饱和之间存在时间差,即在故障开始时TA不立即进入饱和,而是存在一段线性传变区。

2) TA未饱和时,二次电流近似为正弦波。所以此时的二次电流的波形具有对称性。一旦TA发生饱和,二次电流波形变得不规则,波形的对称性消失。

3) TA饱和后,二次电流发生缺损和畸变,其结果等效于在工频电流的基础上叠加了谐波电流。高次谐波中2次、3次谐波占比重最多。

4) TA饱和后,因为一次电流中交流分量的负向去磁作用,TA在过零点附近会有一段线性传变区可以正常传变一次电流,也就是说TA发生饱和

后,总会在过零点附近短暂地退出饱和。

5) TA饱和后,二次电流在进出饱和点处会发生突变,波形的斜率会发生突然减小或增大的情况。

2 电流互感器饱和检测混合算法

利用故障录波器中的二次电流作为检测饱和的原始数据,根据TA饱和后的二次电流谐波比重高与波形不对称的特征,提出了一种利用谐波分析与波形分段积分相结合的饱和检测算法,详述如下。

2.1 二次电流谐波分析

TA发生饱和时,二次电流波形发生畸变和缺损,其等效于工频电流叠加高次谐波电流信号。高次谐波在二次电流中所占的比例能反映二次电流缺损和畸变的程度。因此,对二次电流进行谐波分析,计算谐波电流与基波电流的比值,可作为TA是否发生饱和及其饱和程度的判据。

文献[7]给出了影响谐波比判断准确性的几点因素:①分析谐波时所选取的采样数据不能少于一个周期,否则计算结果会失真;②暂态电流中的非周期分量会使谐波的计算结果产生振荡;③谐波比阈值设定不合适,也是影响谐波判据的重要因素。

谐波分析法的具体步骤如下。

1) 首先对TA二次电流波形 $i(t)$ 作傅里叶变换,得到TA二次电流中的基波和各次谐波表达式为

$$\begin{aligned} i(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, a_0 为二次电流中的周期分量; I_n 为 n 次谐波的幅值; φ_n 为 n 次谐波的初始相位,其计算公式均在文献[3]中给出。

2) 其次计算出各次谐波含量后,用式(5)计算谐波比,即

$$\alpha = \sqrt{\sum_{n=2}^m I_n^2} / I_1 \quad (5)$$

式中, α 为谐波比; n 为二次电流所含谐波次数; m

为计算谐波比所计及的最高次谐波； I_n 为二次电流中 n 次谐波的幅值； I_1 为基波幅值。

TA饱和后，2次、3次谐波为主要的谐波成分。针对某故障后暂态饱和波形给出了计及至不同次谐波的谐波比计算结果，如表1所示。

表1 计及不同次谐波的谐波比计算结果

Tab.1 The calculation results of considering different harmonics

计及最高谐波次数	谐波比
3	0.410 9
4	0.446 4
5	0.452 8
6	0.461 3
7	0.463 8
8	0.466 6

从表1可以看出，当计及至6次谐波时，随着谐波次数的增加，谐波比的变化已经很小，为了保证计算准确度，本文计算到第7次谐波。

2.2 波形分段积分原理

TA未饱和时，经TA传变过来的二次电流近似为正弦波。即使由于电力系统短路故障导致二次电流中含有非周期分量，待滤除非周期分量后，二次电流的波形也基本与正弦波相同。TA发生饱和后，二次电流发生畸变，波形变得不规则，不再具有正弦波的对称性。饱和程度越深，畸变程度越严重，波形呈现的不规则性越明显。因此通过分析波形是否具有正弦波的对称性检测饱和现象是否发生。

TA未饱和时，二次电流波形未发生畸变，如图3a所示。由于正弦波的对称性，各段波形的积分面积基本相同，近似可得

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_4 \quad (6)$$

当TA发生饱和后，在一个周期内，二次电流由于发生畸变和缺损，波形变得不规则，失去了正弦波的对称性，如图3b所示。计算一周期内各段波形与0值水平线所围成的面积，可以发现各段波形的积分面积相差较大，且饱和越严重，各段波形的面积差别也更为明显。由此可以通过计算各段波形的积分面积得出各段波形面积差别，并以此检测TA是否饱和。具体算法为：对波形作分段积分，即将一周期的二次电流波形按5 ms进行

分段，每段电流波形进行积分求取，并与对称轴围成的面积比较面积之间的差异大小，同时进行波形对称性的判别。

当发生短路故障时，一次电流中会掺杂非周期分量，使电流波形发生偏移，失去了关于正负半轴的对称性。即使没有发生饱和，分段后各段波形的积分面积仍然不相等，如图3c所示。由此得出，非周期分量是影响分段积分法可靠性的关键因素，所以用此原理检测饱和时，需先滤除电流波形中非周期分量。

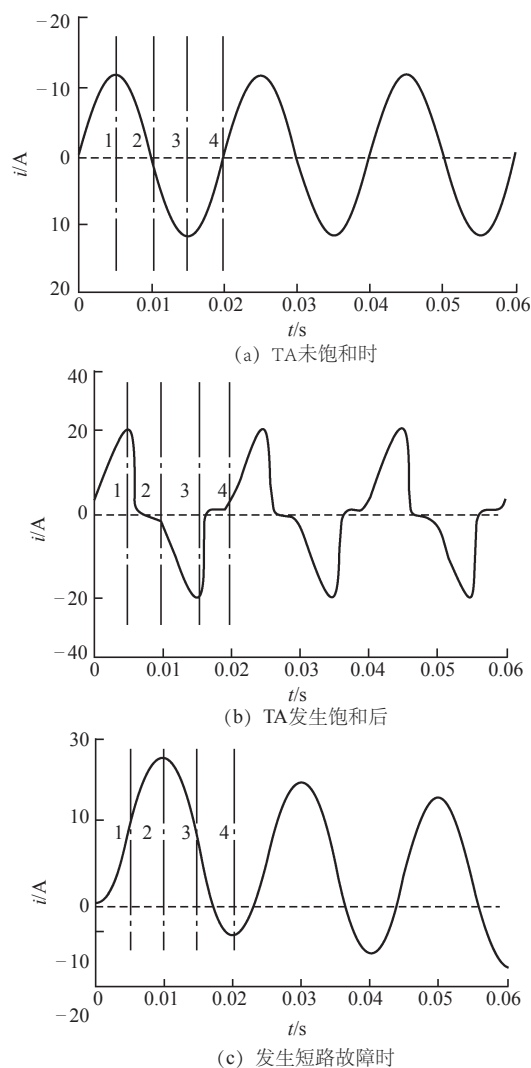


图3 波形分段积分原理

Fig.3 Waveform segmentation integration principle

2.3 饱和检测方法判别

根据两种饱和检测算法的原理，并充分发挥两种检测算法的优越性，现给出电流两种算法相

结合的TA饱和检测判据:

1) 用相电流突变量启动的方式找到二次电流的突变点, 进行故障启动判断。

2) 滤除原始数据中的非周期分量, 从故障起始点开始, 找出一周期内的待检测波形。

3) 利用式(5)计算本周期内波形的谐波比 α 。

4) 用矩形法离散求和代替连续积分近似计算极值点后一个周期内的各段波形的面积, 即

$$S = T_c \sum_{k=1}^{N/2} |i(k)| \quad (7)$$

5) 将计算得到的谐波比与预设的阈值进行比较。如果满足 $\alpha > \alpha_0$, 再用波形面积比判据对波形进行检测; 如果波形面积比判据依然超过阈值, 即满足 $S_c > S_{c0}$, 因此认定此电流波形为TA饱和情况下的二次电流波形。

特别指出, 本文探讨TA饱和检测混合算法的目的, 是为了从大量录波数据中准确收集TA饱和信息, 以便实现TA性能评估及饱和规律分析, 而非作为保护防误动作判据内嵌于保护装置中, 所以其速动性不是本文考虑的关键问题。同时, 文献[8]指出, 当稳态周期分量磁通密度大于饱和磁通密度时, TA可能在故障启动点后的第二周期初段才发生饱和。当二次电流波形在故障后一周内没有饱和特征时, 混合算法要对两个连续周期内的波形分别进行检测, 以防止饱和和漏判现象的发生。TA饱和检测混合算法流程如图4所示。

3 混合算法的工程实现

利用录波的实际数据对算法进行测试, 并分析测试结果后发现, 由于现场波形数据的复杂多样性, 实际工程中存在的某些干扰因素影响混合算法的可靠性和准确性。本文针对各种干扰因素及工程需要对算法进行改进, 并设定了适用于混合算法的启动阈值。

1) 受到过渡电阻、故障电流本身的谐波干扰可能造成故障电流波形的短暂畸变以及分段积分计算必须以零点或者极值点作为检测起始点等原因的共同影响, 将检测起始点定位在故障起始点, 会对算法的使用造成很大的干扰。因此考

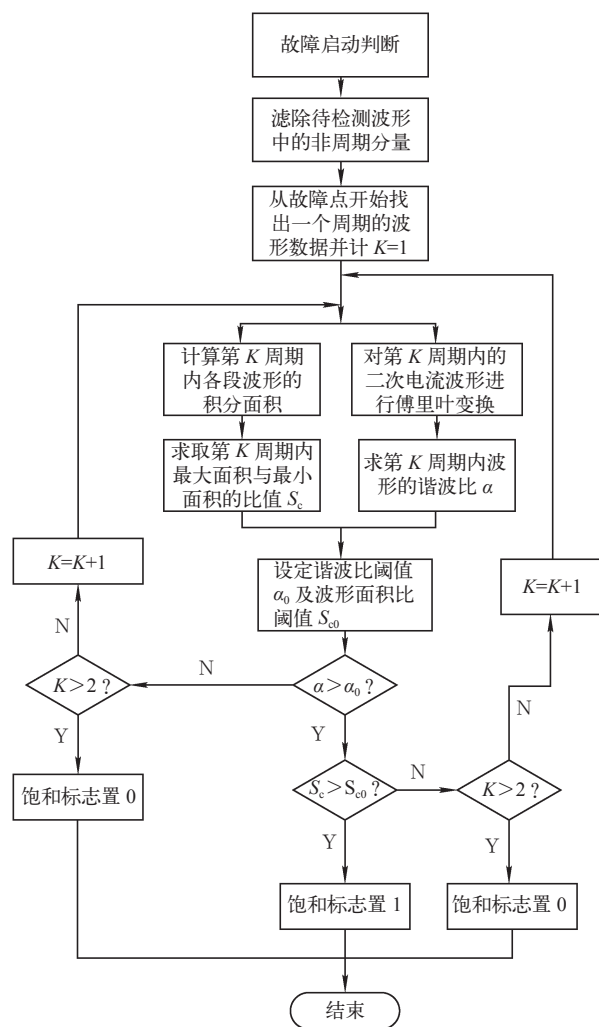


图4 TA饱和检测混合算法流程图

Fig.4 TA Saturation detection hybrid algorithm flow chart

虑将检测起始点由二次电流突变点后移至短路峰值电流点, 以消除上述干扰因素对混合算法的影响。

2) 将检测起始点后移至短路峰值电流点后, 在某些暂态过程较短的情况下, 可能无法完成两完整周期的波形数据采样。考虑到检测起始点后移之后第一次采样的数据之中已包含了第二周期的部分波形数据, 即使饱和发生在故障后第二周期, 仍可在第一次检测过程获取饱和特征, 故将检测时间长度设定为起始点后一周。

3) 根据实际工程需要, 结合大量录波的测试结果, 分别为谐波比判据和面积比判据设定了适用于本混合算法的启动阈值。大量测试结果表明, 未饱和情况下, 二次电流的谐波比总是低于

0.1,即使故障电流波形存在非饱和引起的轻微畸变时,谐波比的数值通常也低于0.2。鉴于谐波判据为混合算法的初选判据,应尽量避免漏判,所以将谐波比的门槛值设为0.1。理想状态下,未饱和时分段积分法的计算结果应无限接近于1。然而,滤除非周期分量存在的误差、波形非饱和引起的轻微畸变及采样频率等因素均会使面积比的数值略微增大。大量测试结果表明,未饱和情况下计算的面积比通常在1~1.5之间;而在饱和情况下,面积比通常会大于1.5。鉴于面积比判据为本算法的复选判据,应最大限度地规避误判,故而将面积比的门槛值设为1.5。

4 工程实例分析

改进后的实用化混合算法已可基本兼顾实际工程中出现的各种复杂情况,能够在各种录波数据中快速准确地筛选出饱和波形。现展示部分测试结果以表明混合算法的改进效果。

图5为录波装置记录的110 kV鸡云线A相转三相故障时的电流波形,从图5中可以看出发生转换性故障后,鸡云线B、C相所连TA饱和,运用检测算法根据录波数据成功地筛选出此饱和波形。鸡云线检测结果如表2所示。

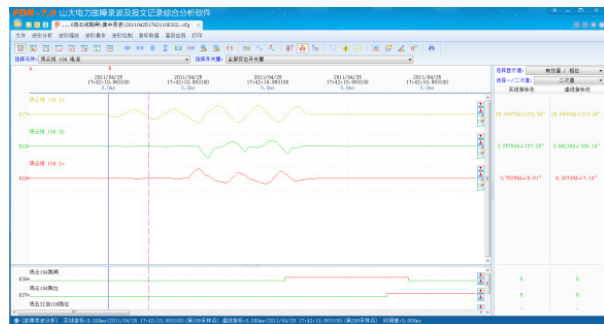


图5 110 kV鸡云线电流波形

Fig.5 110 kV power line current waveform

图6为恒盛变压器低压侧35 kV恒双线重合闸后发生永久性三相故障时B、C两相的波形,B、C相所连TA发生饱和亦被检测出来。恒盛变压器饱和和检测结果如表3所示。

图7为500 kV换江甲线发生C相短路接地故障,录波装置显示故障相的电流波形出现非饱和和原因引起的波形畸变,测试结果中,谐波含量超

表2 鸡云线检测结果

Tab.2 110 kV power lines test results

相别	谐波比	面积比	结果	结论
B相	0.394 7	3.484 0	饱和	正确
C相	0.303 2	2.159 7	饱和	正确

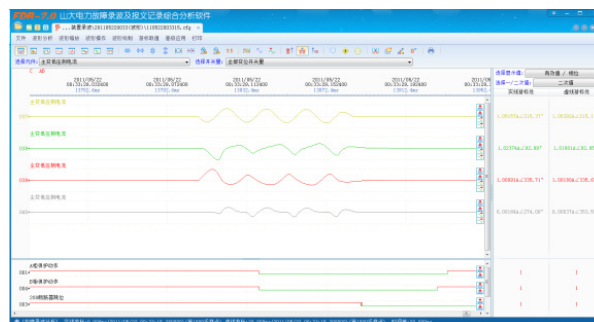


图6 恒盛主变压器低压侧电流波形

Fig.6 Hengsheng main transformer low voltage side current waveform

表3 恒盛变压器饱和和检测结果

Tab.3 Hengsheng transformer saturation test results

相别	谐波比	面积比	结果	结论
B相	0.425 5	1.697 4	饱和	正确
C相	0.336 6	1.785 4	饱和	正确

过门槛值,面积比则低于门槛值,通过面积比判据的二次筛选成功地规避了饱和误判的发生。换江甲线检测结果如表4所示。

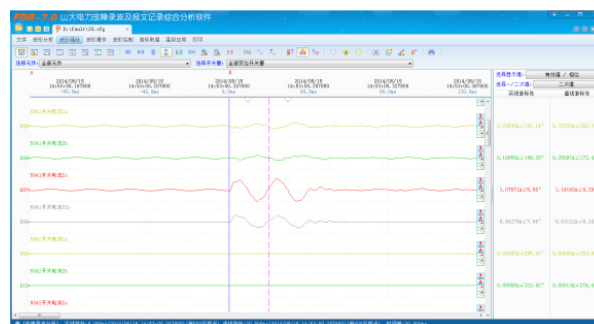


图7 500 kV换江甲线电流波形

Fig.7 500 kV Huanjiangjia line current waveform

表4 换江甲线检测结果

Tab.4 Huanjiangjia linear test results

相别	谐波比	面积比	结果	结论
C相	0.309 2	1.238 1	未饱和	正确

5 结束语

本文深入探讨一种TA饱和检测混合算法。利用大量录波数据对算法进行测试,并针对实际工程中的干扰因素和实际需要建立改进措施,实现了更具实用性的混合算法,为从大量录波数据中快速准确地收集TA饱和信息提供了手段,同时为评价TA性能及分析饱和规律创造了有利条件。

参考文献

- [1] 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):1-4,8.
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, 8.
- [2] 王玉梅,谷斐,张国治,等.基于双判据融合的电流感器磁饱和检测算法[J].河南理工大学学报(自然科学版)2015,34(3):390-395.
WANG Yumei, GU Fei, ZHANG Guozhi, et al. A method for detecting current transformer saturation based on double criteria[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(3): 390-395.
- [3] 张庆伟,赵翔,谭建成.基于多阶导数配合的CT饱和检测[J].电力系统保护与控制,2008,36(5):10-13.
ZHANG Qingwei, ZHAO Xiang, TAN Jiancheng. Multiple derivatives based CT saturation detection method[J]. Relay, 2008, 36(5): 10-13.
- [4] 张新刚,王泽忠.采用电压波形特征的电流互感器饱和检测方法[J].电网技术,2005,29(14):59-63.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong. A method detecting current transformer saturation by utilizing features of secondary voltage waveform[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 59-63.
- [5] 林森,陈斌.一种基于相关分析的CT饱和检测方案[J].电力科学与工程,2011,27(3):55-58.
LIN Sen, CHEN Bin. One scheme of CT saturation detection based on correlation analysis[J]. Electric Power Science & Engineering, 2011, 27(3): 55-58.
- [6] 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 EPSA, 2000, 12(5): 19-24.
- [7] 李贵存,刘万顺.利用小波原理检测电流互感器饱和新方法[J].电力系统自动化,2001,25(5):36-39.
LI Guicun, LIU Wanshun. A new method for detecting saturation of current transformer based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 36-39.
- [8] 袁季修,盛和乐,吴聚业.保护用电流互感器应用指南[M].北京:中国电力出版社,2004.

作者简介



郑茂然

郑茂然(1981-),男,高级工程师,硕士,从事电力系统继电保护运行管理工作。

(收稿日期:2018-06-20) **EA**