

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0180-05

基于 QT 的变压器故障录波数据分析系统研究

张卫双, 邢娜, 张宇

(黑龙江省科学院智能制造研究所, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 精准分析变压器的保护动作特性、及时排查潜在故障隐患, 对保障电力系统持续稳定运行具有不可替代的重要意义。传统的变压器保护系统多采用硬件设备主导的监测模式, 依赖专用监测装置与专业技术人员的现场值守, 实现对变压器运行状态的实时监测与故障诊断。然而, 这种传统模式存在诸多突出问题, 不仅硬件设备购置与部署成本较高, 且设备后期维护工序繁杂、难度大, 需要投入大量人力物力, 同时故障诊断的响应速度与精准度易受人为因素影响, 难以满足现代电力系统智能化、高效化的运行需求。因此, 基于 QT 平台开发了基于故障录波数据的变压器保护动作特性分析系统, 本系统通过全波差分傅里叶、谐波分析及序分量分析等算法对录波数据进行处理。本文应用哈尔滨光宇电气自动化有限公司所提供的故障录波数据, 结合本系统进行实例分析, 实现了对该录波数据进行波形重现以及故障特征量分析。

关键词: 故障录波数据; 数据分析; QT 平台; 变压器; 动作特性分析; 故障特征

中图分类号: TP206+.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0180-05

Research on transformer fault recording data analysis system based on QT

ZHANG Weishuang, XING Na, ZHANG Yu

(Institute of intelligent manufacturing Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: Accurate analysis of the transformer's protection action characteristics and timely identification of potential fault hazards are of irreplaceable important significance for ensuring the continuous and stable operation of the power system. The traditional transformer protection system mostly adopts a hardware-dominated monitoring mode, relying on special monitoring devices and on-site duty of professional and technical personnel to realize real-time monitoring and fault diagnosis of the transformer's operating status. However, this traditional mode has many prominent problems: it not only has high costs for the purchase and deployment of hardware equipment, but also the later maintenance process of the equipment is cumbersome and difficult, requiring a lot of human and material resources investment. At the same time, the response speed and accuracy of fault diagnosis are easily affected by human factors, which is difficult to meet the intelligent and efficient operation needs of the modern power system. Therefore, this paper develops a transformer protection action characterization system based on fault recording data based on the QT platform. The system processes the recorded waveform data through algorithms such as full-wave differential Fourier, harmonic analysis and sequence component analysis. This paper applies the fault recording data provided by Harbin Guangyu Electric Automation Co., Ltd. and analyzes the example of this system to realize the waveform reproduction of the recording data as well as the analysis of fault characteristics.

Keywords: fault recording data; data analysis; QT platform; transformers; action characteristics analysis; fault characteristics

供电领域与人类日常生活和相关产业有很大的关联, 供电系统保持运行的安全性及可靠性与整个社会以良好的状态发展有很大的联系。供电领域想要保证维持安全运行就要做到在各个方面都可以可靠运转, 本文研究的电力变压器是电网中供电系统的核心, 它的可靠安全运转可以说与整个电力领域的可靠运转有着非常直接的关联^[1]。本文研究的微机故障录波装置是用来存储电力系统运行中暂态过程的重要工具, 在电力系统运行出现故障或振荡的时候, 由它记录下来的发生故障时不同电气量的改变和保护装置运行状态, 给确定故障类型、评估保护的動作时

效性提供了重要信息^[2-3]。通过研究记录下来的暂态录波数据, 能够更加精确地确定电力系统、线路和变压器等电气设备所发生的故障情况, 以及故障具体位置、相别演变过程以及故障类型。

QT 平台与其他的开发环境相比最显著的优点在于它具有完善的跨平台体系, 它能够使多个应用开发一起在此环境下运行, 涵盖了目前所存在的全部应用广泛的平台。当 QT 使用跨平台功能时仅编写一次程序即可, 再通过其他平台再次编译此程序。可以说 QT 能够在嵌入式范畴始终被广泛应用, 多数归功于它具有完善的跨平台体

收稿日期: 2024-07-28; 录用日期: 2024-09-04

基金项目: 黑龙江省科学院科技战略研究项目 (QYCX2024ZN01)

作者简介: 张卫双 (1998—), 女, 研究实习员, 研究方向: 智能控制。

引用本文: 张卫双, 邢娜, 张宇. 基于 QT 的变压器故障录波数据分析系统研究 [J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3): 180-183, 188. (ZHANG Weishuang, XING Na, ZHANG Yu. Research on transformer fault recording data analysis system based on QT [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(3): 180-183, 188.)

系^[4-5]。利用QT的可跨平台特点,可以实现应用不同平台工作的技术人员都可以使用同样的工具来分析故障录波数据^[6-10]。

因此,本文对故障录波数据处理、故障特征分析以及变压器保护装置数字模拟的方法进行研究,并利用QT平台开发了基于故障录波数据的变压器保护动作特性分析系统。为了提高故障诊断的准确性,还对插值处理、特征量分析、相位校正、幅值校正、序分量分析和谐波分析等各个环节的实现方法进行了分析。

1 系统总体结构

本文设计了基于故障录波数据的变压器保护动作特性分析系统,这个系统包括文件读取与数据存储、波形展示、故障特征量分析、变压器保护特性分析4个模块,其中,变压器保护特性分析模块实现的功能是给变压器分段保护分析特征量的整定值进行配置,并完成对变压器常用微机保护模块的动作特性分析。该系统不仅可以完成对录波数据波形的分析、矢量的分析以及序分量分析等基本特征量的研究,还可以计算真有效值及基波有效值等特征量随着变压器运行时间变化而改变的数值,以及查看变压器发生故障时相应的保护是否开始动作;该系统可通过使用鼠标滑轮也能完成对各电气量的波形进行横向、纵向缩放等操作,使技术人员的工作效率得到很大程度的提升。

“变压器保护动作特性分析系统”构成以及各子系统间的关系如图1所示。

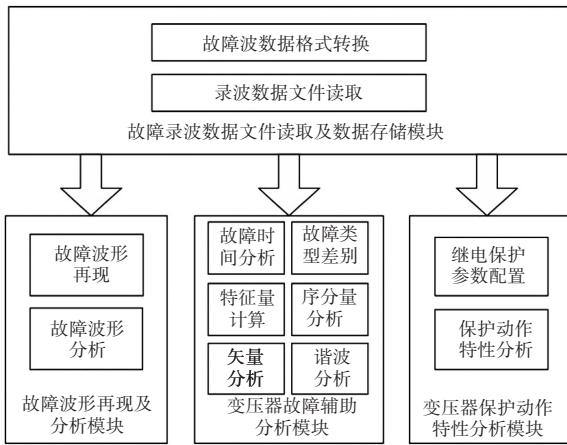


图1 基于故障录波数据的变压器保护动作特性分析系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of transformer protection operation characteristic analysis system based on fault recording data

2 算法设计

2.1 全波差分傅里叶算法

微处理器继电保护的关键问题之一是使用一个正确的离散算法,以确保最后成果的准确性符合工程需要,同时使计算时间尽可能少,能够实现可以精准判断又能满足速度和稳定性的需要。如果有衰减的直流分量存在于输入的信号中,使用全波傅里叶算法得出的结果将会出现一

些偏差。比如输入这一信号。

$$i(t) = I_0 e^{-\alpha t} + \sum_{n=1}^M I_m(n) \cos(n\omega t + \Phi_n) \tag{1}$$

应用全波傅里叶算法,如下所示。

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(n\omega t) dt = I_m(n) \cos \Phi_n + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\alpha t} \cos(n\omega t) dt \tag{2}$$

$$b_n = I_m(n) \sin \Phi_n + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\alpha t} \sin(n\omega t) dt \tag{3}$$

令

$$\begin{cases} \delta_a = \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\alpha t} \cos(n\omega t) dt \\ \delta_b = \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\alpha t} \sin(n\omega t) dt \end{cases} \tag{4}$$

式中, T 表示采样周期, I_m 为电流的最大值, I_0 表示 $n = 0$ 时的采样值。

由上文内容可得,含有衰减非周期分量的电气量中 $I_0 \neq 0, \alpha \neq 0$ 则 $\delta_a \neq 0, \delta_b \neq 0$ 。想要获得准确无误的输出数据,需先算出衰弱的非周期量而导致的 δ_a 和 δ_b , 通过时域方式应用全波差分傅氏算法的运算流程如图2所示。

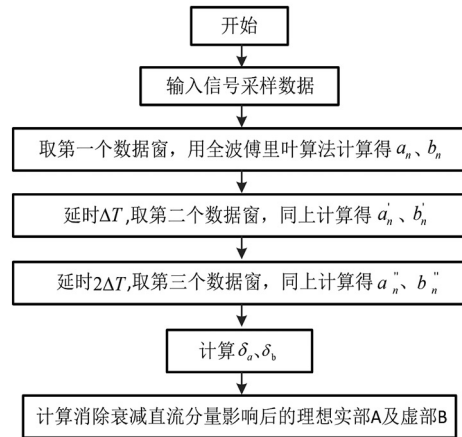


图2 全波差分傅里叶算法程序流程图

Fig. 2 Flow chart of full-wave differential Fourier algorithm program

本节首先分析了衰减直流分量对广泛使用的全波傅氏算法所带来的影响,进而引出了对全波傅氏算法进行改进,在将原算法功能进行保留的基础上,还实现了将衰减直流分量进行滤除功能,使其对应的应用范围更加广泛。计算改进后的全波傅氏算法需提供的数据量只在原始全波傅氏算法需提供数据量的基础上再增加两个采样点,全波差分傅氏算法不仅计算量不大,且可以保证相对较高的计算精度。

2.2 谐波分析算法

当电网频率与额定状态有一定偏差时,会造成傅里叶算法的频谱泄漏^[11],导致计算错误,有时甚至还会造成对各次谐波的幅值和相位确定有误。为了解决这个问题,本文运用一种针对故障录波数据的加窗谐波分析算法完成谐波处理。

1) 以 $T_s = 0.04/N$ 对电流波形采样并获取采样序列; 将采样序列中的随机一点作为起点得到基频序列 $i(n)$, 然后调整 m 个采样数据, 再获得一组基频序列 $i'(n)$;

2) 针对基波, 对 $i(n)$ 进行加窗 DFT 计算得

$$I_R = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot v(n) \cos\left(\frac{4\pi}{N} \cdot n\right) \quad (5)$$

$$I_I = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot v(n) \sin\left(\frac{4\pi}{N} \cdot n\right) \quad (6)$$

3) 针对基波, 对 $i'(n)$ 进行加窗 DFT 计算得

$$I'_R = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i'(n) \cdot v(n) \cos\left(\frac{4\pi}{N} \cdot n\right) \quad (7)$$

$$I'_I = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i'(n) \cdot v(n) \sin\left(\frac{4\pi}{N} \cdot n\right) \quad (8)$$

4) 计算第 i 次谐波的幅值和初相位。

$$I_{Ri} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot v(n) \cos\left(\frac{4i\pi}{N} \cdot n\right) \quad (9)$$

$$I_{Ii} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot v(n) \sin\left(\frac{4i\pi}{N} \cdot n\right) \quad (10)$$

$$I_i = \frac{2\sqrt{I_{Ri}^2(N) + I_{Ii}^2(N)}}{|V(-\eta_i \Delta\omega)|} \quad (11)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1}\left(-\frac{I_{Ri}}{I_{Ii}}\right) - \eta_i \pi \quad (12)$$

式中, $v(n)$ 为间距为 N 的 bartlett 窗数据, $\Delta\omega = 2\pi/N$,

$$V(\omega) = \left[\frac{\sin(N\omega/4)}{\sin(\omega/2)}\right]^2, \eta_i = \eta_1。$$

该谐波分析算法能够在频域上具有良好的削弱性能, 因此能够减少泄漏频率的影响, 提高谐波检测的准确性和可靠性, 有助于高效地诊断电力系统故障。本文以实现电流波形的谐波计算为例, 如果是想要获得电压波形的谐波, 把电压信号转换为电流即可实现, 原理相同。

2.3 录波数据文件读取

COMTRADE 全称为 IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems, 即电力系统暂态数据交换标准通用格式。COMTRADE 文件会有 4 个文件, 它们分别是, 头文件、配置文件、数据文件和信息文件, 这 4 个文件使用不一致的扩展名进行区别。头文件扩展名是“.HDR", 配置文件扩展名是“.CFG", 数据文件扩展名是“.DAT", 信息文件扩展名是“.INF"。根据 COMTRADE 标准格式要求, 在录波文件中的配置和数据文件是很重要的, 二者含有变压器发生故障时相关电气量的变动以及保护动作信息, 所以对波形读取文件主要工作是对这两个文本展开的。

1) 配置文件的读取

按照 COMTRADE 要求中提到的规范的配置文本格式, 需要对后缀名是 .CFG 的文本中每行信息进行获取, 配置文件中的所有信息将储存在 QT 中自定义的结构体数组中, 这使得对元素的操作变得简单高效。

在进行读取配置文本的编程时, 回车/换行和逗号可以当成标识符来获取配置文本中的所有信息。获得配置

信息的程序如图 3 所示。

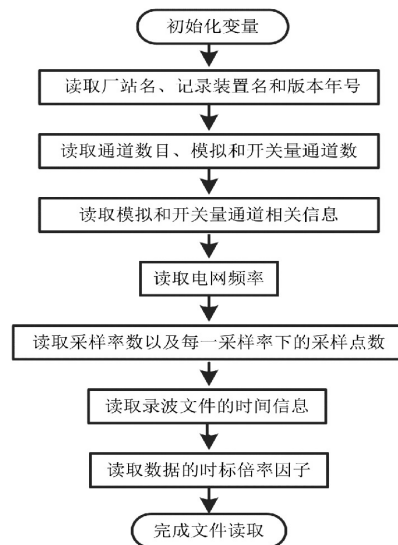


图 3 配置文件的读取流程

Fig. 3 Reading process of configuration file

2) 数据文件的读取

在故障录波数据分析系统中, 进行数据文件读取时, 首先需要找到后缀名为“.DAT”的文件, 因为它与配置文件在同一个文件目录中而且不包含后缀名的文件信息一致, 我们只需获取在读取配置文件时已经存储好的文件名称, 将文件名称的后缀名替换为“.DAT”, 如果该文件夹中对应的数据文件缺失或名称有误, 将会在系统中提示错误信息, 来提示技术人员检查文件是否有误。读取配置文件和数据文件顺序执行, 全部存储完成后会出现一个提示对话框, 显示所有故障录波数据文件已经读取完成^[12-17]。

3 实例分析

3.1 变压器故障录波数据来源

本文所研究的故障录波数据是哈尔滨光宇电气自动化有限公司所做的动模试验得到变压器故障录波数据, 动模试验为动态模拟试验的简称, 是由在 RTDS(动态数字仿真设备) 或实际等值装置上来对电力领域中的一些正常运行状态及故障情况进行模拟, 此实验使保护及控制系统在实际工况下可以安全稳定运行的试验^[18-20]。此录波数据采样频率为 5 000 Hz, 系统运行频率是 50 Hz, 每个模拟量通道的采样点数为 10 000 点, 系统采样频率的变换次数为 1 次。

3.2 故障数据的波形展示界面

为了对录波数据进行合理的管理, 提高技术人员对录波数据分析的工作效率, 本文所设计的变压器故障录波数据分析系统实现了录波文件的存储、读取、添加、删除等功能。本系统读取故障录波文件后, 分别对不同通道的数据进行波形展示, 将其绘制成图形可以更加直观地展示三相电流及电压的变化情况, 便于技术人员在发生故障时对故障类型及保护进行分析。该系统读取故障录波数据的波形图如图 4 所示。

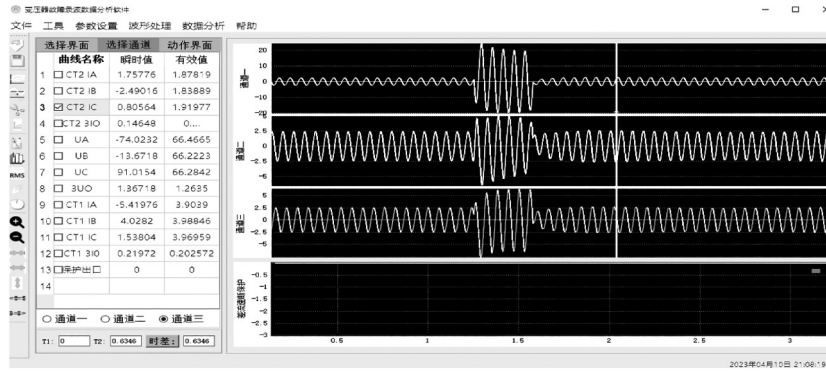


图 4 变压器单相接地故障 CT2 电流波形

Fig. 4 Current waveform of CT2 under single-phase grounding fault of transformer

3.3 功能测试及实验结果分析

3.3.1 谐波分析

系统将从主界面获取的数据存储到谐波界面后,开始计算谐波含量等信息,然后将数据展示在系统界面中,当前读取的文件是变压器 A 相发生单相接地故障时的录波数据文件,所以我们选取了变压器低压侧 CT2 对应的 A 相故障时的采样点,也可以通过曲线名称栏中的复选框查看其他通道的谐波含量信息,变压器单相接地故障时 CT2 对应的 A 相电流谐波含量图如图 5 所示,根据表格中的数据 and 柱状图信息,我们可以看出在非故障时故障录波数据中的 5 次谐波含量较大,在故障时 2 次谐波含量占比最大,这也印证了我们可以使用系统中的二次谐波闭锁功能

对变压器发生故障时进行保护。

3.3.2 序分量分析

通过序分量分析图能够实现变压器故障录波数据中任意通道电流或电压的各序分量进行展示,技术人员既可以在发生故障时依照序分量图更加便利地得出变压器故障相及类型,本系统研究的序分量界面是一个独立于主界面的单独界面,可以提高主界面空间的利用效率。序分量分析界面的数据也是从主界面中获得,与主界面中的游标实现联动,移动游标的同时,序分量界面分析的数据点将同步改变。如图 6 所示,在这个录波文件中,变压器发生故障时正序分量与负序分量的相位差几乎为 0,故根据故障判别分析中序分量选相可得,该故障为 A 相接地故障。

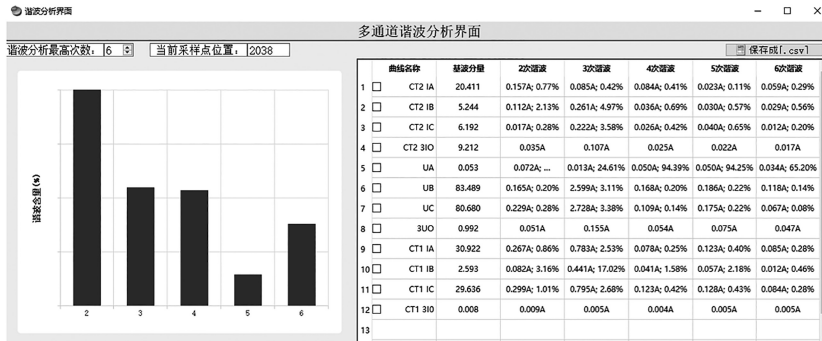


图 5 变压器单相接地故障时 CT2-A 相电流谐波含量

Fig. 5 Current harmonic content of phase CT2-A during single-phase grounding fault of transformer

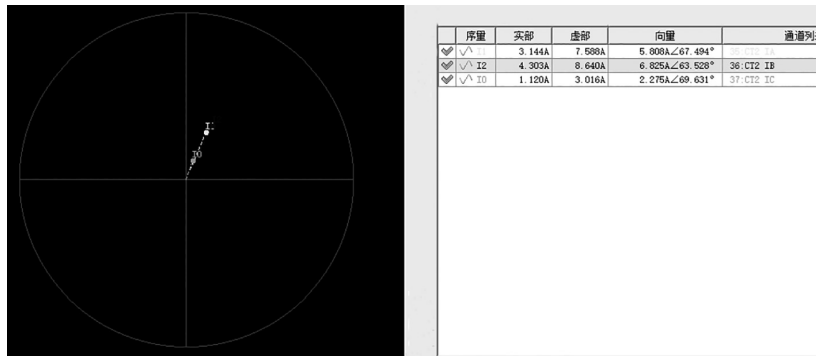


图 6 变压器 A 相接地故障序分量图

Fig. 6 Sequence component diagram of phase A grounding fault of transformer