

电力故障录波装置数据技术的研究

唐 华

(国网盐城供电公司, 江苏 盐城 224000)

摘 要: 随着故障录波装置在电力系统中的广泛应用, 录波装置提供的故障报告和录波数据已成为电力系统故障分析和安全自动装置动作行为评价不可缺少的依据。本文是在继电保护运行管理系统的框架下研究故障录波数据综合分析技术, 本文在分析了故障录波装置的原理、结构以及现有系统的基础上, 分析了波形数据输入模块、故障特征量计算模块及图形用户界面模块的实现方法。数据输入模块根据波形数据文件进行分析与评价; 故障特征量计算模块用于计算电压、电流波形中基波分量的幅值和相位, 进而进行序量、功率、功率方向、阻抗和谐波的计算; 最后用仿真软件生成具体的波形数据对上述功能模块进行调试, 并对系统各项功能进行测试。

关键词: 故障录波; 继电保护; 波形数据; 故障特征量

0 引言

电力系统的互联趋势带来了明显的经济效益, 但互联不仅使系统的动态行为更加复杂, 也使得原本的局部故障波及到整个系统, 这种故障连锁效应容易造成大面积停电, 给工业生产及人们的生活造成不良影响。由于独特的性能, 在电力系统中, 故障录波装置的应用日趋广泛, 它所提供的检测报告以及录波数据对分析电力系统发生的故障类型、原因等至关重要, 也为后续的继电保护以及其他动作行为提供了依据^{[1][2]}。

纵观国内外的故障录波装置, 其一般主要通过二次装置的实时监控来分析继电保护的動作行为以及确定电力系统发生故障的位置等。因此, 研究电力系统故障录波数据综合分析技术对电力系统故障的分析、排除、预防等十分必要, 同时也减小了电力系统互联给工业生产及人们的生活带来的不利影响。

1 绪论

随着各种原理的微机保护以及安全自动装置的大范围普及, 录波装置生产厂家配套提供的离线分析软件无论在功能上还是在性能上都体现出明显的不足; 如果这些离线分析软件的分析处理结果不能匹配系统实际运行的情况, 这将给保护动作装置带来误判、不利于分析电气故障发生的原因、类型等信息, 从而不能快速准确地排除故障。目前, 根

据建设继电保护运行管理系统的要求, 电力部门多采用故障录波器和继电保护测试仪生产厂家所提供的配套软件来分析录波装置采集到的波形信息并还原故障及预防功能。这些软件多侧重于故障录波装置上传报文格式的转换、简单的谐波分析、矢量分析和故障测距功能的实现, 以及重放故障波形以测试保护与自动装置。显然, 其核心功能即对故障后暂态波形的精确分析和特征参数的测量, 以及在此基础上实现的对不同保护判据和相关算法输出的校核不够完善。对于上述存在的问题, 迫切需要探索更加完善的故障录波数据综合分析系统, 这对于防止保护装置由于各种因素产生的技术错误、提高电力系统发生故障时的分析能力、完善保护装置的動作行为等会产生重要的推进作用。

2 电力系统故障录波装置概述

电力系统故障录波装置对于电力系统来说相当于一个“黑匣子”, 记录着系统发生故障前后的各种工作状态和工作参数等信息, 系统发生故障时, 电压、电流中含有的低次谐波及其变化趋势等都可以通过采集到的数据进行分析, 从而能够快速确定事故起因并找到防止措施, 装置的重要参数包括采样速率、A/D 转换位数、最大故障电流记录能力和录波记录时间。

故障录波装置在硬件方面^{[3][4]}一般包括数据采集单元、采集系统管理单元和现场分析站。硬件结

构一般有两种：非嵌入式结构和嵌入式结构^[5]。其中，嵌入式结构是指将数据采集单元、采集系统管理单元以及现场分析站放置在同一个装置内，优点

在于将数据采集与系统管理单元以及现场分析站等模块做统一的设计，在工程应用中较为普遍。结构框图如图 1 所示。

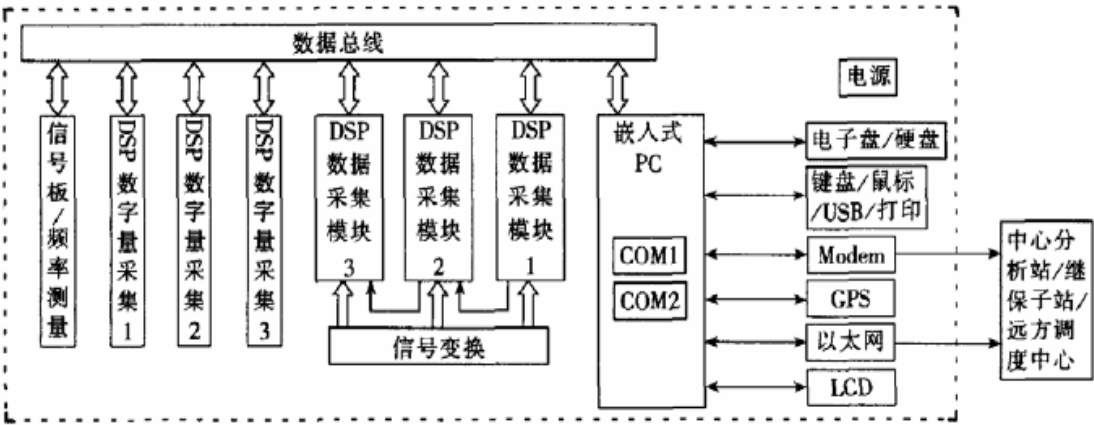


图 1 嵌入式故障录波装置结构图

故障录波系统的软件部分当于整个系统的“灵魂”，包括数据采集单元和采集系统管理单元的各种软件以及现场分析站软件，其中采集系统管理单元软件的主流程图如图 2 所示。

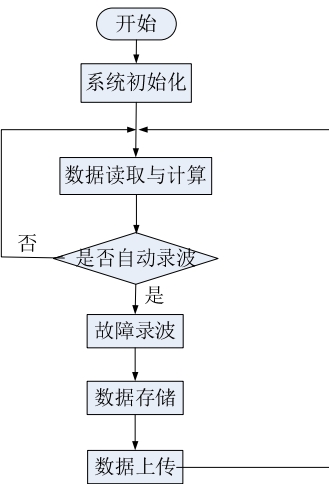


图 2 采集系统管理单元流程图

现场分析站软件作为录波装置软件部分的重要一环，应完成的工作主要有：对采集到的数据进行处理、对故障产生的原因、类型进行分析、根据需要设置录波装置运行和启动的关键参数及启动方式的选择等。而数据采集单元中的软件的作用一般是用于接受上层单元的命令同时采集相关数据。其关键作用大致包括：数据的采集与计算、确定录波是否启动、故障录波、GPS 对时以及数据的网络传送与保存。

3 故障录波数据综合分析系统总体设计

3.1 总体结构设计

本系统在主要由数据输入模块、故障特征量计算模块和用户界面模块组成，结构框图如图 3 所示。

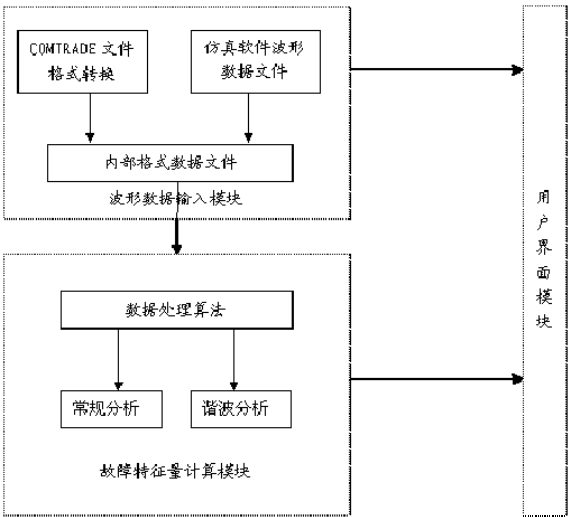


图 3 系统结构

波形数据输入模块用于录入装置采集到的波形数据。数据输入模块根据设置读入一组或多组 COMTRADE 格式的波形数据文件，进而根据其参数文件提取相应的波形数据，供后续分析和评价使用。

故障特征量计算模块根据用户选择的算法和

数据处理环节，计算电压、电流波形中基波分量的幅值和相位，进而进行序量、功率、功率方向、阻抗和谐波的计算。

用户界面模块用于人机交互，并显示以上分析结果。本系统设计了功能齐全的菜单、简洁的窗口，简单易操作。

3.2 方案概述

采用理论研究、应用开发和实验验证相结合的研究方法，采用先进的离线分析算法，从理论上解决决定采样率采集的波形数据中衰减直流分量、谐波和频率波动（非同步采样）影响特征参数（如瞬时幅值、相位和频率）测量精度，进而影响对保护动作行为进行分析这一关键问题，并事先通过软件仿真进行验证。

在验证方案方面，首先选择使用 Matlab 软件生成的模拟数据对各项环节中的关键技术进行调

试；进而采用电力系统电磁暂态仿真程序 EMTDC 生成故障波形数据联调各项研究开发成果；最终采用故障录波装置获取的实际故障波形数据对独立系统模块的各项功能进行整体测试。

4 模块的设计与实现

波形数据输入模块首先将录波数据转换成系统内部格式，然后再送入特征参数计算模块和保护装置动作行为分析模块进行分析。数据输入文件包括两个部分：COMTRADE^[6]文件数据输入和电力系统仿真软件数据输入。对于各种电网中的仿真软件（如 PSCAD / EMTDC 等）产生的.out 文本格式波形数据文件，容易读取其中的数据并存储到内部格式数据文件中。其数据存放要有统一的格式，具体要求如表 1 所示。

表 1 数据存放格式

列	1	2	3	4	5	6	7	8	9
项	时间 t	A 相电压	A 相电流	B 相电压	B 相电流	C 相电压	C 相电流	电压 3U0	电流 3I0

故障特征量计算模块根据用户选择的算法和数据处理环节，计算电压、电流波形中基波分量的幅值和相位，进而进行序量、功率、功率方向、阻抗和谐波的计算。故障特征量计算模块一般由故障波形分析模块、保护动作分析模块、故障测距模块三部分组成。

4.1 基波幅值和相位计算

故障波形分析模块使用先进的离线波形分析算法对波形数据进行精确分析，准确计算基波分量的瞬时幅值、相角与频率参数，以及含有的低次谐波的幅值与相角及频率参数。利用上述计算出的参数来解析保护装置的动作行为，为后续的分析供应凭证。

系统提供两种数据处理环节和两种算法供用户选择，用以准确计算基波分量的瞬时幅值和相位。其中数据处理环节包括同步处理环节和差分处理环节。离线波形分析算法能对发生故障后采集到的波形数据进行精确地分析计算，常用的有全周傅氏算法与时频原子变换算法两种。

4.2 序量计算及功率方向分析

电力系统中发生三相不平衡状态较为常见，对称分量法将三相不平衡的电流、电压通过变换将其

转变为三组对称的正序、负序及零序向量。以 a 相做基准相，以电压举例说明，则算出：

$$\begin{cases} \dot{U}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha\dot{U}_b + \alpha^2\dot{U}_c) \\ \dot{U}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha^2\dot{U}_b + \alpha\dot{U}_c) \\ \dot{U}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \end{cases}$$

\dot{U}_{a1} ， \dot{U}_{a2} ， \dot{U}_{a0} 分别为正序、负序、零序分

量。

针对各个序量功率方向的计算办法法，定义如下：

$$\dot{P}_\phi = \text{Re}[\dot{U}_\phi \dot{I}_\phi e^{-j\varphi}] \quad (1)$$

其中， $\phi=0, 1, 2$ ； \dot{U}_ϕ 、 \dot{I}_ϕ 为故障分量

下的序电压、序电流分量， \dot{I}_ϕ^* 为 \dot{I}_ϕ 的共轭相量， φ 为外部 ϕ 序阻抗角（本系统缺省值为 78° ）。本系统规定，功率方向正方向为从母线指向系统（线路）。

4.3 阻抗分析

相间阻抗计算公式为:

$$Z_{\phi\phi} = \frac{\dot{U}_{\phi\phi}}{\dot{I}_{\phi\phi}} \quad (2)$$

其中, $\phi\phi = AB, BC, CA$; $I_{AB} = I_A - I_B$,

$$I_{BC} = I_B - I_C, \quad I_{CA} = I_C - I_A。$$

接地阻抗计算公式为:

$$Z_{\phi} = \frac{\dot{U}_{\phi}}{\dot{I}_{\phi}} \quad (3)$$

其中, $\phi = A, B, C$ 。

4.4 故障分量分析方式说明

电力系统发生故障时, 其电压、电流可分解为故障前状态下非故障分量和故障分量。故障分量仅在故障后出现, 因为其性能稳定, 系统振荡等对其影响极小, 所以广泛应用于保护启动元件中。

故障分量计算公式为:

$$\Delta x_k = x_k - x_{k-N} \quad (4)$$

其中, Δx_k 为在 k 采样时刻故障分量的计算值, x_k 为 k 时刻原波形数据的采样值 x_{k-N} 为 k 时刻之前一周期的采样值。本系统为了更清楚的显示

故障分量, 取 N 为 $2N$ 。

4.5 故障测距

故障测距也称为故障点定位, 它可以根据各个故障特征精准并且快速的确定故障点的位置, 因此它可以增强输电线路的稳定性, 另一方面还可以减少人力物力的投资。故障测距按照测量原理的差别可以分为阻抗法、注入法以及行波法; 按照测量端的数量又可分为单端、双端以及多端测距; 另一方面根据是否在线可分为离线、在线测距。

4.5.1 积分测距算法

积分测距法的原理如图 4 所示。当 f 点出现故障时, 分别测量 M 和 N 两端的数值, 由此计算出输电线路的电压 U_M 以及 U_N 。在点 M 到点 f 段也就是故障点的前段的电压 U_{Mx} 为真正的电压值, 因为故障点后段的电流发生了变化, 所以在点 f 到点 N 段也即故障点后段的电压 U_{Nx} 则是虚假的值。同理, U_{Nx} 在 N 至 f 段的电压值为真正值, 而在点 f 到点 M 段电压值为虚假值。但是通过 M 、 N 两端的数据计算故障点 f 处的电压值, 其结果相等。令 $\Delta U = U_{Mx} - U_{Nx}$, 则 ΔU 的最小值所对应的就是故障点。

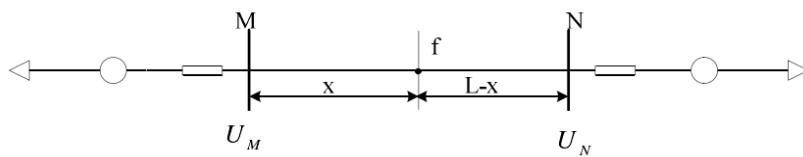


图 4 积分测距算法原理图

积分测距算法可以有效的降低过渡电阻对测距带来的影响, 并且此算法只要获得线路两端的测量参量即可, 要求的数据窗非常短, 所以该算法稳定性强, 结构简单, 便于实现。

4.5.2 阻抗测距算法

通过故障发生时录波器采集到的电压、电流值可以求出在故障回路上的阻抗, 设定线路中各参数分布均匀, 且在不同的故障情况下, 上述计算出的回路阻抗与监测点到故障发生处之间的距离成正比, 依据这些信息可以得到故障距离。这种方法计算简便, 很容易对故障位置进行定位。

以单相系统接地短路故障为例, 设 m 端为测量端, 则测量点与故障点之间的阻抗为:

$$Z_m = ZD_{mF} + \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m} R_F \quad (5)$$

式中, Z 为线路单位长度阻抗; D_{mF} 为测量点 m 与故障点 F 之间的距离; \dot{I}_F 为故障点的短路电流; \dot{I}_m 为监测处 m 端的电流; R_F 为故障发生处的过渡电阻。

4.5.3 分布参数测距算法

图 5 为故障线路示意图, 线路全长为 L , 假

设线路在距离 M 端口 x 处出现故障点 f ，线路两侧母线 M 端、N 端的电压相量分别为 \dot{U}_M 、 \dot{U}_N ；两

端的电流相量分别为 \dot{I}_M 、 \dot{I}_N 。

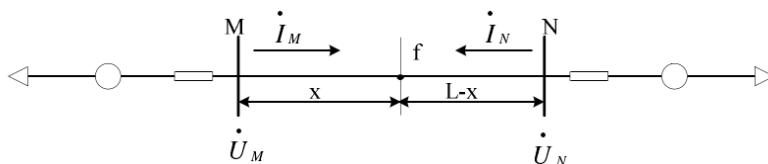


图 5 故障线路示意图

线路的电压方程为：

$$\dot{U}_f = \dot{U}_M \cosh \gamma x - \dot{I}_M Z_c \sinh \gamma x \quad (6)$$

$$\dot{U}_f = \dot{U}_N \cosh \gamma (L-x) - \dot{I}_N Z_c \sinh \gamma (L-x) \quad (7)$$

式(6)、(7)合并后，化简得：

$$e^{2(\beta+j\alpha)x} = \frac{e^{\gamma L}(\dot{U}_N - \dot{I}_N Z_c) - \dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c}{\dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c - e^{-\gamma L}(\dot{U}_N - \dot{I}_N Z_c)} \quad (8)$$

由于 β 是实数，令

$$\frac{e^{\gamma L}(\dot{U}_N - \dot{I}_N Z_c) - \dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c}{\dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c - e^{-\gamma L}(\dot{U}_N - \dot{I}_N Z_c)} = A + jB \quad (9)$$

求得故障点位置

$$x = \frac{0.25 \ln(A^2 + B^2)}{\beta} \quad (10)$$

利用 α 可得到另一故障点位置公式：

$$x = \frac{1}{2\alpha} \arctan \frac{B}{A} \quad (11)$$

5 系统运行例析

运行文件 IAS.exe，初始界面出现后，选择“文件”——“打开”——“COMTRADE 格式文件”，出现文件选择界面如图 6 所示，找到并选择需分析的 COMTRADE 格式文件的 CFG 配置文件，点击确定完成数据输入。

数据输入完毕后，主菜单“数据选择与处理”选项被激活，点击该选项出现数据选择与处理界面如图 7 所示，选择好通道数据、数据信号（全电压电流量或故障分量）、数据处理环节（差分和同步

处理环节）和数据处理算法（全周傅式算法或时频原子变换算法）后，点击 **确定** 按钮进行计算。

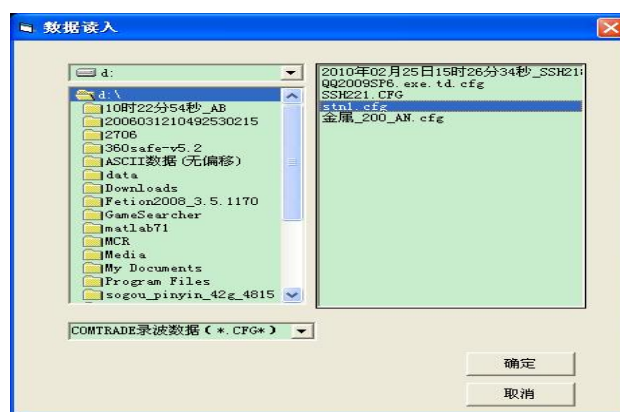


图 6 文件选择界面

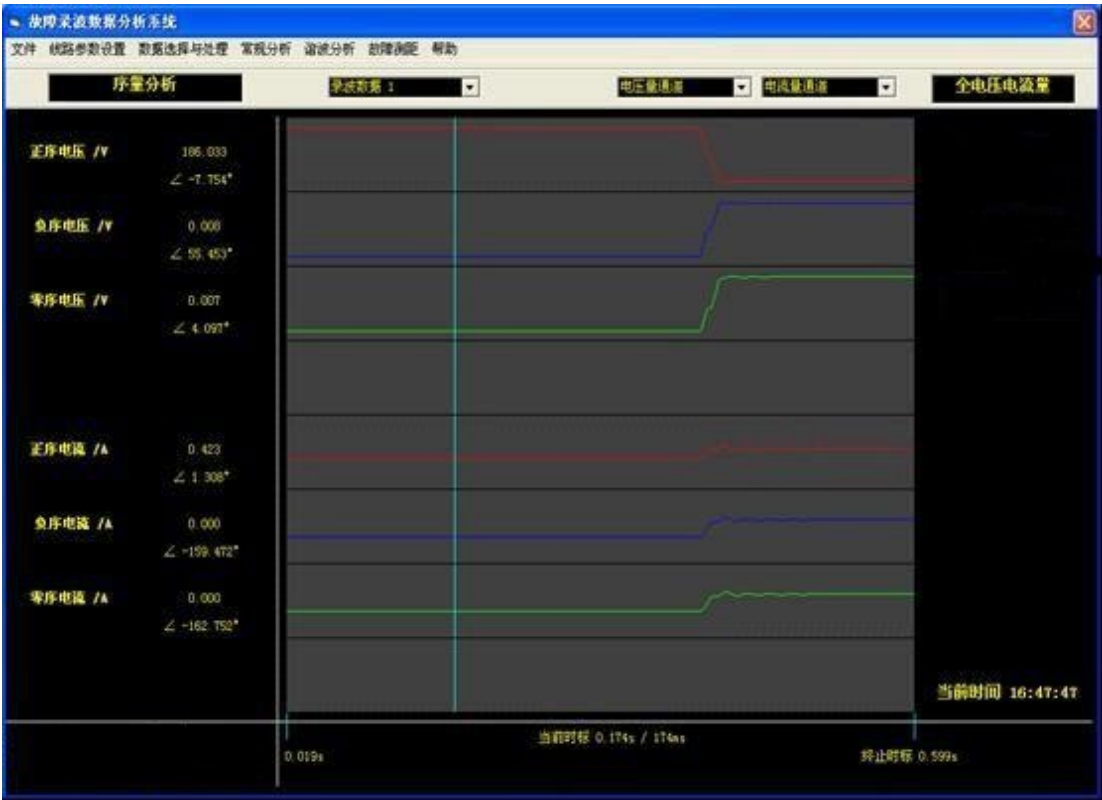
分析计算完毕后，主菜单“常规分析”、“谐波分析”被激活，系统显示输入数据的原始波形，若在数据选择与处理界面中的“数据信号选择”中选择“全电压电流量”，“常规分析”下拉菜单中除“功率方向分析”外其余选项可选；若在“数据信号选择”中选择“故障分量”，“常规分析”下拉菜单中除“功率分析”和“阻抗分析”外其余选项可选。

序量分析（全电压电流量+故障分量）中显示的正、负、零序电压电流的分析情况如图 8 所示，幅值数据下方为相应的角度值。

“阻抗分析”只在选择“全电压电流量”时可选，显示的 A、B、C 3 相接地阻抗和 AB、BC、CA3 种相间阻抗的分析情况如图 9 所示。



图 7 数据选择与处理界面



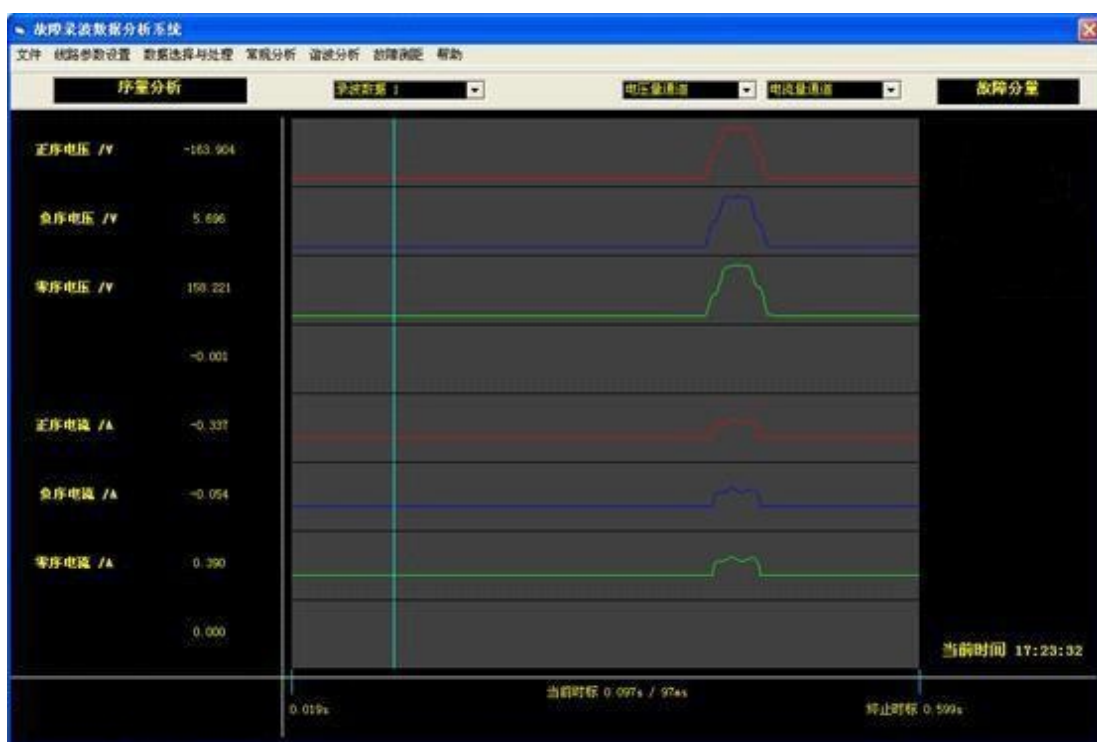


图 8 序量分析处理界面



图 9 阻抗分析处理界面

6 结论

本文通过开发故障录波数据综合分析系统，可以对不同地点录波装置故障数据的统一分析，采用国际统一的 IEEE COMTRADE 1999 作为基础，对不同厂家、不同型号录波器记录的数据进行分析，

兼容其他电力系统模拟软件生成的数据文件，确保通用性。采用软件方式实现波形数据的同步调整，采用先进的算法对故障波形数据进行精确计算分析，减少低次谐波对分析计算电压、电流的相角与幅值时产生的影响，提供了序量、功率、功率方

向、阻抗、谐波等派生量的分析功能及故障测距功能,再此基础上将典型的故障测距算法的输出进行信息融合,以提高故障测距精度。

参考文献:

- [1] DL/T 553-94.220kV~500kV 电力系统故障动态记录技术
准则[S]. 1994.
- [2] 赵自刚, 赵春雷. 国产故障录波器现状分析及新型录波器
展望[J]. 电网技术, 1993, 2(3): 45-46.
- [3] 王哲, 焦彦军, 张新国,等. 高性能故障录波器的方案设计
[J]. 电力自动化设备, 2003,2(3): 40-42.

- [4] 梁军. 先进电力故障录波监测系统和精确故障定位研究
[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] 王晓兰, 李建海, 肖骏. 基于虚拟仪器技术的便携式故障
录波装置设计. 2008, 36(23): 73-75.
- [6] Advancements in Microprocessor Based Protection and
Communication, IEEE Tutorial Course, Operation Center,
1997.

作者简介:

唐 华 (1987-), 男, 江苏东台人, 工程师, 从事电网规
划与设备研究的工作。