

基于 VC++ 和 Matlab 混合编程实现 电力故障再现及分析系统研究

徐鑫鑫¹, 刘涤尘¹, 黄 涌²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 华中电网技术中心, 湖北 武汉 430077)

摘要: 结合 VC++ 和 Matlab 各自的优势, 提出一种基于两者的混合编程方法并应用于电力故障再现及分析系统, 以实现故障波形再现、谐波分析、矢量分析和故障测距等功能。采用 VC++ 实现系统框架和界面的绘制, 采用 Matlab 实现计算和绘图, 能充分发挥 Matlab 计算和绘图方便的优点, 并克服了 M 文件运行依赖 Matlab 环境的缺陷。简要介绍了将 Matlab M 文件直接嵌入 VC++ 环境, 实现计算和绘图的方法。着重介绍了故障测距算法原理, 其采用一种改进的基于微分方程模型的单端测距算法实现。谐波分析采用二次抛物线插值和快速傅里叶变换实现。系统通过对基于 COMTRADE 格式故障录波文件的分析, 以数据、表格和图形的方式综合显示分析结果。结果表明系统有良好的应用效果。

关键词: COMTRADE; 故障分析; 故障测距; 故障录波器

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0038-03

采用 IEEE 1991 年公布的 COMTRADE 格式可对微机保护装置和故障录波器的数据文件进行统一标准规范, 为大电网的故障恢复和分析提供一个便捷的平台^[1-3]。本文在基于 COMTRADE 99 标准格式的基础上, 利用 VC++ 和 Matlab 混合应用实现了故障波形的再现、谐波分析、矢量分析和故障测距等功能。

1 系统的组成模块

系统由故障数据装载、波形显示和故障分析等模块组成, 如图 1 所示。

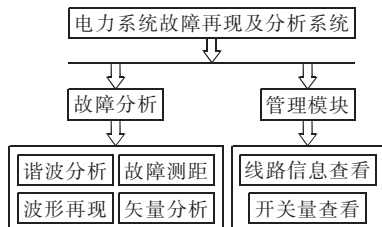


图 1 系统结构图

Fig.1 The system structure

a. 故障数据装载模块。获取电力故障波形信息, 将按 COMTRADE 标准格式保存的录波文件读入并存储在所声明的各个变量中。按 COMTRADE 标准, 故障文件由 3 部分组成, 其中 CFG 文件记录配置信息, DAT 文件为数据文件, HDR 文件为头文件, 补充线路信息。

b. 波形显示模块。将录波数据以图形直观地进行显示, 可将出现故障线路三相电压、电流故障前一段时间内的波形绘出, 同时还可以显示线路每一时

刻电压和电流的瞬时值。

c. 故障分析模块。故障分析模块为本系统的主要功能模块, 包含有谐波分析、矢量分析和故障测距等模块。谐波分析利用快速傅里叶算法实现, 完成线路电流或电压波形的频谱分析。矢量分析模块以图形显示出线路三相电压、电流的相角关系。故障测距模块利用录波数据以单端测距解微分方程的方法计算出故障距离。

2 系统功能的实现

2.1 计算与分析平台

本系统主要以 Visual C++ 6.0 为开发工具, 算法实现部分由 Matlab 完成。本文利用 Mathworks 公司的 Matcom 软件在 VC 环境中直接以 C 语言的形式调用 Matlab 函数, 同时可将 Matlab 绘制的图形直接嵌入 VC 对话框中。利用 Matlab 计算和绘图功能强大的特点^[4], 缩短软件的开发周期, 同时可以快速实现复杂的算法, 且软件可以完全脱离 Matlab 环境, 克服了传统 Matlab engine 编程依赖 Matlab 环境的缺陷。程序编写前进行的一些设置工作可参见文献^[4]。配置工作完成后直接以下面的形式调用 Matlab 函数。

```
.....  
initM(MATCOM_VERSION); // Matcom 初始化  
Mm a; // 定义 Mm 类型数据  
Matlabfunction(a); // Matlab 函数  
exitM(); // 退出 Matcom 环境  
.....
```

Matlabfunction() 为 Matlab 函数, 只支持 Matlab 矩阵形式的数据 Mm。运算前后将 Mm 数据类型与 C 语言的数据类型进行转换即可实现混合编程。

同时, Matlab 绘制的图形可以嵌入 VC 窗口中, 下面的程序实现将绘制的图形嵌入 VC 静态框中:

```
clf();
CWnd *p1=NULL;
p1=(CWnd *)GetDlgItem(IDC_STATIC1);
//取得静态框句柄
Mm PlotHandle=winaxes(p1->m_hWnd);
//绘图句柄,通过此句柄控制图形的显示和属性
Mm a;
double result[500];
.....//算法的实现过程
M_VECTOR(a,result);//将数据结果 result 传给矩阵数组 a
plot(result);//图形的显示,调用 Matcom 封装函数显示
```

Matcom 提供了 plot()、bar()、stem() 等 Matlab 常用绘图函数,方便了图形的绘制,还可以通过 set() 函数控制图形的属性。

2.2 谐波分析

电网进行谐波分析时,采用快速傅里叶变换,各次谐波分量的计算公式为

$$x(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j \frac{2\pi (k-1)(n-1)}{N}} \quad 1 \leq k \leq \frac{N}{2} \quad (1)$$

式中 $|x(k)|$ 为第 k 次谐波的幅值, $x(n)$ 为采样的数据, N 为 1 个周期的采样点数。

由 Shannon 采样定理可知,可以计算的最高的谐波次数为 $N/2$ 。当采样点数不等于 $2^n (n \in N)$ 时,由式(1)进行谐波的频谱分析时,软件执行纯粹的 DFT 运算,当采样频率很高时,计算量将呈几何级数增加,运算速度减慢。因此,本系统采用二次抛物线插值的方法使插值结点数等于 $2^n (n \in N)$,这时软件采用基 2 的快速傅里叶算法,运算速度最快。

二次抛物线插值采用的是 Lagrange 插值法,假设 $x_1 < x_2 < \dots < x_N$ 为 N 个已知的采样点,其采样值已知,分别为 $X(1)、X(2)、\dots、X(N)$ 。采用等间距插值的方法,将采样周期等分为 $2^n - 1$ 个区间,则在此区间上刚好有 2^n 个点需要插值。设 k 为要插值的点,选取离其最近的 3 个点 $x_{j-1}、x_j、x_{j+1}$,即使 $\sum_{i=j-1}^{j+1} (k-x_i)^2$ 达到最小。则 k 点的插值函数值为^[5]

$$X(k) = \frac{(k-x_i)(k-x_{i+1})}{(x_{i-1}-x_i)(x_{i-1}-x_{i+1})} X(i-1) + \frac{(k-x_{i-1})(k-x_{i+1})}{(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})} X(i) + \frac{(k-x_{i-1})(k-x_i)}{(x_{i+1}-x_{i-1})(x_{i+1}-x_i)} X(i+1) \quad (2)$$

试验表明此算法具有较高的计算精度^[6]。算法采用直接调用 Matlab 函数 fft 和 interp1 分别完成快速傅里叶变换和二次抛物线插值的方法实现,过程简单,计算效率高。

2.3 故障测距

故障测距算法根据利用线路的双端量还是单端量可分为单端测距算法和双端测距算法^[7-8]。考虑到是利用录波装置采集的数据,而没有故障相邻段的信息,同时也没有行波信号,因此本系统采用了一种输电线路 $R-L$ 模型的解微分方程的单端测距算法,下面介绍算法的基本原理。

假设被测线路的分布电容可以忽略,则线路可用如下的模型简化,如图 2 所示,故障点设为 F , AF 段占线路全长 AB 的百分数为 P ^[9-10]。

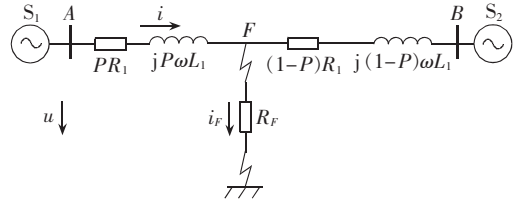


图 2 双端电源系统单相接地故障电路简化模型

Fig.2 The simplified model of single-phase grounding fault in a double source system

由图 2 可以列出

$$u = PR_1 i + PL_1 \frac{di}{dt} + i_F R_F \quad (3)$$

式中 $R_1、L_1$ 分别为装置安装处线路 AB 的正序电阻和电感; $u、i$ 分别为装置安装处的电压和电流。

对于相间短路(如 a、b 相短路),则 u 取 u_{ab} , i 取 $(i_a - i_b)$ 。

对于单相接地短路(如 a 相接地短路),则

$$u_a = PL_1 \left[\frac{R_1}{L_1} (i_a + K_r 3i_0) + \frac{d(i_a + K_L 3i_0)}{dt} \right] + 3i_{0F} R_F \quad (4)$$

式中 $K_r = (r_0 - r_1)/(3r_1)$ 、 $K_L = (l_0 - l_1)/(3l_1)$ 分别为电阻和电感的零序补偿系数, $r_1、r_0、l_1、l_0$ 分别为输电线路单位千米的正序、零序电阻和电感; $i_0、i_{0F}$ 分别为流经装置安装处和过渡电阻 R_F 的零序电流。

假装置安装处和故障点处的零序电流同相位,则下式成立

$$3i_{0F} R_F = \frac{3i_0}{K_{0A}} R_F = 3i_0 R'_F \quad (5)$$

式中 K_{0A} 为零序电流分布系数, R'_F 为计及对侧助增作用后的过渡电阻。

其中, K_{0A} 为实数,将上式代入式(4)则得:

$$u_a = PL_1 \left[\frac{R_1}{L_1} (i_a + K_r 3i_0) + \frac{d(i_a + K_L 3i_0)}{dt} \right] + 3i_0 R'_F \quad (6)$$

取不同的采样点的数据代入,联立方程即可求出未知数 P 。

设 $x_1 < x_2 < \dots < x_N$ 为已知的采样点时刻,其电压采样值为 $u(1)、u(2)、\dots、u(N)$,电流采样值为 $i(1)、i(2)、\dots、i(N)$,中性线上的电流为 $3i_0(1)、3i_0(2)、\dots、3i_0(N)$ 。则取不同的采样点可以建立 2 个方程。

$$u(j) = PL_1 \left\{ \frac{R_1}{L_1} [i(j) + K_r 3i_0(j)] + \frac{[i(j) + K_L 3i_0(j)] - [i(j-1) + K_L 3i_0(j-1)]}{x_j - x_{j-1}} \right\} + 3i_0(j)R'_F \quad (7)$$

$$u(j+1) = PL_1 \left\{ \frac{R_1}{L_1} [i(j+1) + K_r 3i_0(j+1)] + \frac{[i(j+1) + K_L 3i_0(j+1)] - [i(j) + K_L 3i_0(j)]}{x_{j+1} - x_j} \right\} + 3i_0(j+1)R'_F$$

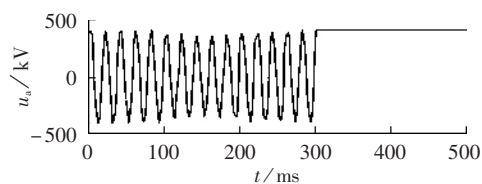
联立以上 2 方程即可解出 P , 从而求出故障点 F 距装置安装处 A 的距离^[11]。

$$x = Pl \quad (8)$$

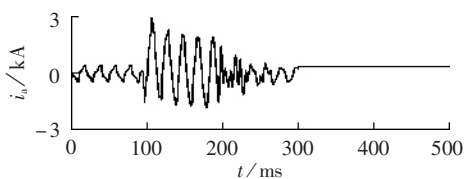
式中 l 为线路 AB 段全长。

3 故障录波分析

本系统的波形再现及分析结果图形如图 3、4 所示。图 4 中, n 为谐波次数, λ 为谐波含量。



(a) 电压波形



(b) 电流波形

图 3 故障点 a 相电压和电流波形

Fig.3 Voltage and current waveforms of phase a at fault point

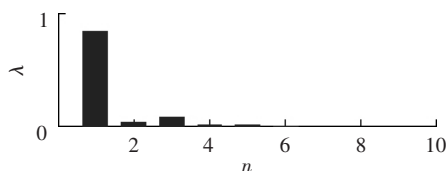


图 4 谐波分析结果图

Fig.4 Harmonic analysis results

通过对故障录波文件的分析,观察故障时线路三相及中性线电压、电流波形,可判断出故障发生的类型、相别及时刻。在识别出故障相别后,将相应的电压、电流量取出,送至故障分析部分,可实现电力故障的谐波、矢量分析及故障测距等功能。如图 3 所示,观察单相接地故障时故障点 a 相的电压、电流波形, a 相电流在 100 ms 左右时发生振荡,由此可判别 a 相发生故障,通过观察 abc 三相及中性线 N 上的电压、电流波形,判别发生 a 相单相接地故障。在约 300 ms 时,故障排除, a 相恢复正常运行,故障录波

器电压、电流采样频率下降。

某时刻三相线路电压、电流的矢量分析结果如下:动模母线 a、b、c 三相电压 $U_a = -23.03 \angle 157.60^\circ$, $U_b = 50.38 \angle 37.48^\circ$, $U_c = -77.12 \angle 277.71^\circ$; 动模母线三相电流 $I_a = 11.02 \angle 73.03^\circ$, $I_b = 0.48 \angle 117.22^\circ$, $I_c = 0.34 \angle 10.39^\circ$ 。由上述数据可知: a 相线路的电流幅值大大超过其他两相电流的幅值,综合故障线路波形图,可判定线路发生 a 相接地短路故障。

4 结语

本文介绍的系统实现了基于 COMTRADE 标准格式的电力系统故障录波数据的波形再现、谐波分析、矢量分析、故障测距等功能,充分利用了故障录波器的数据进行故障的分析及再现,所采用的算法稳定、快速、精确度高,对电力系统故障后的分析和恢复具有较好的应用效果。

参考文献:

- [1] 刘天斌,王永业,柳焕章,等. 基于 COMTRADE 格式的故障分析管理系统[J]. 继电器,2001,29(11):47-49.
LIU Tian-bin, WANG Yong-ye, LIU Huan-zhang, et al. The fault data management & analysis system based on COMTRADE[J]. Relay, 2001, 29(11):47-49.
- [2] 郑敏,黄华林,吕鹏,等. 故障录波数据通用分析与管理软件的设计[J]. 电网技术,2001,25(2):75-76.
ZHENG Min, HUANG Hua-lin, LÜ Peng, et al. General analysis and management software for transient data from protective relaying and fault recorder[J]. Power System Technology, 2001, 25(2):75-76.
- [3] 乌云高娃. 基于 VB.Net 的电力故障离线分析的设计[J]. 计算机工程与设计,2004,25(5):723-726.
WUYUN Gao-wa. Design of off-line analysis in electrical power system fault based on VB.Net[J]. Computer Engineering & Design, 2004, 25(5):723-726.
- [4] 董长虹,余啸海. Matlab 接口技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [5] 张杰,涂东明,张克元. 基于 COMTRADE 标准的故障录波的分析与再现[J]. 继电器,2000,28(11):20-22.
ZHANG Jie, TU Dong-ming, ZHANG Ke-yuan. Analysis and representation of the recorded fault based on standard COMTRADE[J]. Relay, 2000, 28(11):20-22.
- [6] 李庚银,陈志业,宁宇. 快速傅里叶变换的两种改进算法[J]. 电力系统自动化,1997,21(12):37-39.
LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, NING Yu. Two improved algorithm based on FFT[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12):37-39.
- [7] KIESSLING G, SCHWABE S. Software solution for fault record analysis in power transmission and distribution[C]//The Eighth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection. [S.l.]: IEEE Press, 2004:47-49.
- [8] SAKIS M A P, COKKINIDES G J. Visualization and animation of protective relay operation[C]//Digital Object Identifier. [S.l.]: IEEE, 2002:1410-1414.
- [9] 吴必信,王玉秋. 综述单端故障测距算法(二)[J]. 电力自动化设备,1995,15(4):23-25.
WU Bi-xin, WANG Yu-qiu. An introduction to one-terminal fault location algorithms(Second)[J]. Electric Power Automation Equipment, 1995, 15(4):23-25.
- [10] 束洪春,司大军,陈学允. 基于多算法的输电线路故障测距系统[J]. 电网技术,2004,28(7):49-52.

SHU Hong- chun,SI Da- jun,CHEN Xue- yun. IEEE COMTRA-
DE based fault location system with multi- algorithms for trans-
mission line[J]. Power System Technology,2004,28(7):49-52.
[11] 全玉生,李平,张煜,等. 基于微分方程的单端故障测距新算法
[J]. 电网技术,2004,28(21):47-49.
QUAN Yu- sheng,LI Ping,ZHANG Yu,et al. A new one-termi-
nal fault location algorithm based on differential equation[J].

作者简介:
徐鑫鑫(1983-),男,湖北随州人,硕士研究生,研究方向
为电力电子技术与应用(E-mail: xuxx8976@163.com);
刘涤尘(1953-),男,湖北红安人,教授,博士研究生导
师,研究方向为电气工程与自动监控。

Power system fault reoccurrence and analysis system based on hybrid
programming of VC++ and Matlab

XU Xin- xin¹,LIU Di- chen¹,HUANG Yong²

- (1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;
2. Central China Grid Company Limited Technical Centre,Wuhan 430077,China)

Abstract: A hybrid programming method,which combines VC++ and Matlab,is led to power system
fault reoccurrence and analysis system,in which functions of fault waveform reoccurrence,harmonic
analysis,vector analysis and fault locating are implemented. The system structure and interface are
programmed with VC++ while the computation and drawing are implemented through Matlab,which
overcomes the defect of running M-file in Matlab environment. The method of directly merging M
-file into VC++ for computation and drawing is briefly introduced. The fault locating module is
mainly described,which applies an improved single-terminal fault locating algorithm based on
differential equation model. Nearest neighbor interpolation technique and FFT(Fast Fourier Transform)
algorithm are implemented to analyze harmonic. Results with data,table and graph are provided
through the analysis of fault recorder documents based on COMTRADE(Common Format for Transient
Data Exchange for power system). Results show its good performance.
Key words: COMTRADE; fault analysis; fault location; fault recorder