

中压配电线路故障在线监测与识别

张碧慧¹ 杨帆² 刘坚² 郭谋发¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116;
2. 国网福建南平市供电公司, 福建 南平 353000)

摘要 本文针对中压配电线路距离长分布广、故障不易排除等问题, 设计了一套中压配电线路故障在线监测与识别系统。系统由分层结构的监测装置和上位机软件组成, 通信架构基于RS-485、GPRS和以太网的混合通信方式。监测装置采集并上传线路故障波形, 上位机软件调用基于奇异值分解和多级SVM的故障类型识别算法, 显示故障波形及识别结果。实验结果表明, 系统运行稳定, 能有效地监测和识别线路故障, 算法正确率达到94%以上。

关键词: 中压配电网; 线路故障; 在线监测; 故障类型识别

Online Monitoring and Identification of MV Distribution Line Fault

Zhang Bihui¹ Yang Fan² Liu Jian² Guo Moufa¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116;
2. State Grid Fujian Nanping County Electric Power Supply Co., Ltd, Nanping, Fujian 353000)

Abstract An online monitoring and identification system for medium voltage (MV) distribution line fault is developed to avoid the difficulty to exclude fault caused by long distance and wide distribution of MV distribution line. The system consists of hierarchical monitoring devices and PC software. The communication architecture is based on a communication method composed of RS-485, GPRS and Ethernet. Monitoring devices acquire and upload the fault waveform of line. PC software displays fault waveform and recognition result obtained by calling the fault type identification algorithm based on singular value decomposition (SVD) and multilevel support vector machine (SVM). The experimental results show that the system is stable and effective to monitor and identify line faults. In addition, the accuracy rate of proposed algorithm can reach 94%.

Keywords: MV distribution network; line fault; online monitoring; fault type identification

配电网结构错综复杂, 线路分支多且传输距离远, 线路发生故障后, 传统的人工巡线查找法费时费力, 容易导致事故扩大。随着供电可靠性要求的提高, 各供电公司迫切需要一套能够实时监测线路运行状况的在线监测系统, 为配电线路事故预防和故障排查提供有力保障^[1]。

可将配电网馈线在线监测系统按结构分为集中式和分布式。集中式系统的微处理器任务繁重, 系统可靠性差, 且不易扩展^[2-4]。分布式系统的软硬件采用分层结构, 数据逐级上传, 各层之间独立开发工作, 有助于系统维护和升级^[5-7]。现有配电线路监测系统主要实现单相接地故障选线功能, 对其他故障类型的诊断分析较少^[8-9]。随着配电网的规模扩

大, 故障情况愈加复杂, 故障分类作为故障选线、故障定位、保护动作评价等工作的基础^[10], 在配电线路发生故障后准确识别故障类型, 有助于检修人员分析故障原因, 及时排除故障。

本文设计一套由线路监测装置和上位机软件组成的中压配电线路故障在线监测与识别系统。监测装置采集线路故障波形, 结合多种通信技术上传波形数据并通过人机交互界面显示。上位机软件调用基于奇异值分解(SVD)和多级支持向量机(SVM)的故障类型识别算法, 实现线路故障监测与单相接地、两相接地、两相短路和三相短路等4种故障类型的识别。利用物理仿真系统验证在线监测系统的可行性和准确性。

1 系统总体设计

1.1 系统结构

中压配电线故障在线监测与识别系统（简称“在线监测系统”）是由监测装置和上位机软件组成的分布式系统，系统结构如图 1 所示。监测装置分为电压型和电流型，上位机软件分为通信服务器、数据库和用户应用程序。电压型监测装置采集母线电压，并与电流型监测装置以及上位机软件交互，通过 RS-485 总线汇集各个电流型监测装置所采集的变压器低压侧电流和馈线电流，经 GPRS 网络将数据上传给通信服务器，通信服务器将解析后的有效数据存入数据库。用户应用程序从数据库中故障波形数据，调用 Matlab 软件编写的故障类型识别算法，以电压和电流波形为物理量，识别线路的运行状态和故障类型，显示故障信息并发出告警信号。

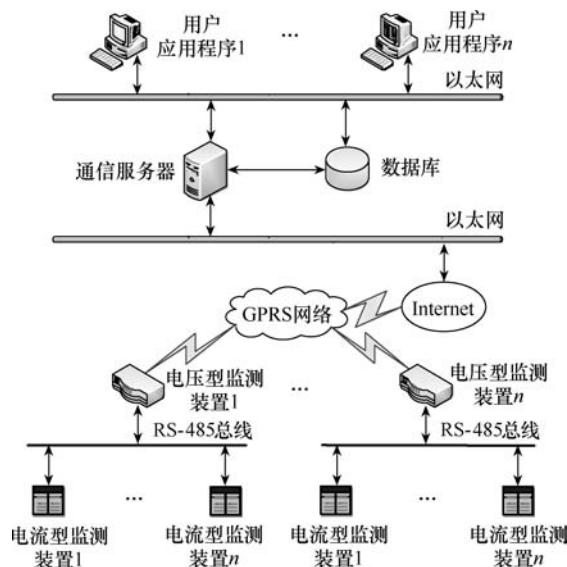


图 1 在线监测系统结构图

1.2 系统通信方式

在线监测系统的通信架构由 RS-485、GPRS 和以太网组成，根据安装环境，设计模块之间的通信方式。电压型监测装置被安装于变电站内的母线 PT 柜，电流型监测装置被安装于馈线柜，通信传输时外界干扰较小，且通信距离短，易于铺设通信线路，因此电压型监测装置和电流型监测装置之间采用一对多的 RS-485 主从式通信方式和串口型 Modbus 规约。安装于变电站或调度中心的上位机软件在现有的光纤局域网基础上，采用传输速率高、可靠性强的以太网通信方式和 TCP/IP 型 Modbus 规约，实现上位机软件与电压型监测装置之间以及上位机软件

各模块之间的信息交互，保障通信的实时性。监测装置与上位机软件安装环境不一，通信距离较远，因此电压型监测装置采用 GPRS 通信方式上传数据，避免重新铺设通信线路，提高监测装置的适应能力。

1.3 通信规约

Modbus 规约的 2 种帧结构如图 2 所示，ADU 为应用数据单元，由 PDU 和附加域组成。PDU 为简单规约数据单元，包含所需传输的有效数据和对应操作指令。串口型 Modbus 规约的 ADU 附加地址域和差错校验，实现传输对象识别和报文校验，可提高 RS-485 的传输可靠性。以太网通信方式自带校验功能，因此 TCP/IP 型 Modbus 规约无需差错校验，只需附加 MBAP 报文头，用于识别传输对象和报文边界。

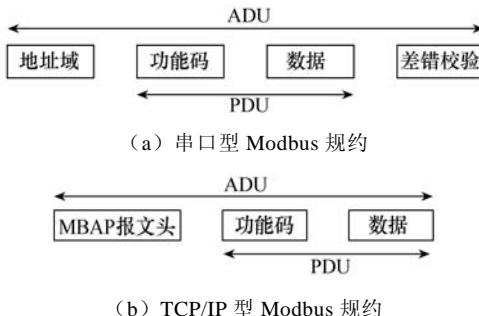


图 2 Modbus 规约的帧结构

2 监测装置设计

2.1 监测装置结构

监测装置采用拔插式模块与总线式设计，通过模块替换实现同一机箱的不同功能转换，提高装置的可扩展性，降低系统成本。电压型监测装置主要由电压采集模块、采集 CPU 模块、通信 CPU 模块、GPRS 模块和总线模块组成，电流型监测装置由电流采集模块、采集 CPU 模块和总线模块组成，模块连接如图 3 所示。

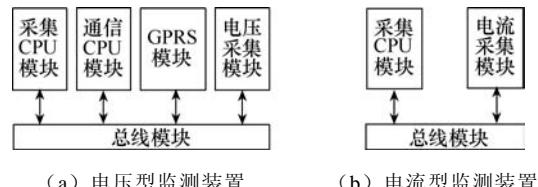


图 3 监测装置模块连接图

电流采集模块经线路 CT 获取变压器低压侧出口处的三相电流信号以及各条馈线的三相电流信号和零序电流信号。电流信号经电流转换器和 AD 芯

片转换送入采集 CPU, 通过 CPU 整合后上发给电压型监测装置。电压采集模块从母线 PT 处采集母线的三相电压信号和零序电压信号, 将转换后的电压信号送入采集 CPU, 汇集完各路电压电流波形后, 通过通信 CPU 上传给上位机。电压型监测装置既作为电压采集装置, 又起数据汇流传输的作用, 相对于以往的监测装置, 可节省一台专门用于数据通信管理的集中器, 结构简化, 易于现场安装。同时采集和通信的 CPU 分立工作, 提升监测装置的实时性能和系统的运行效率。

2.2 监测装置软件功能

电压型监测装置的软件功能主要分成通信传输、故障录波起动和故障电压波形存储等部分, 通信传输功能又分为与上位机之间的报文收发以及与电流型监测装置的交互, 程序流程如图 4 所示。采集 CPU 实时检测电压信号是否异常, 若满足故障录波起动判据, 则开始录制电压波形并由通信 CPU 下发录波指令给电流型监测装置, 波形汇总后将波形数据按规约格式打包上传给上位机软件。电流型监测装置的软件功能较为简单, 主要利用采集 CPU 实现故障电流波形存储以及与电压型监测装置的通信传输。

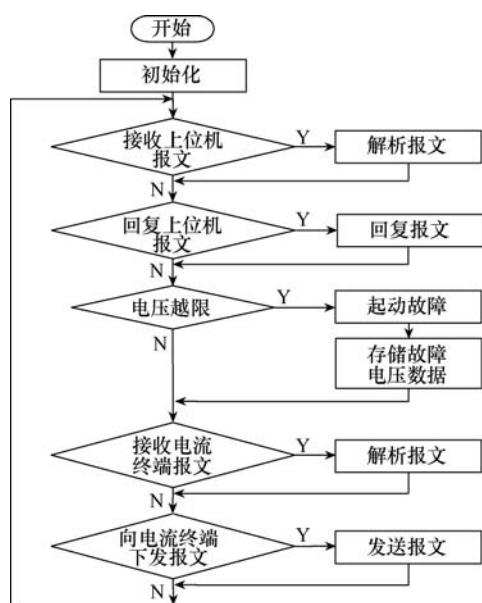


图 4 电压型监测装置的程序流程图

3 上位机软件设计

上位机软件的数据通信服务器和用户应用程序采用图形化编程软件 LabVIEW 开发, 数据库由 SQL Server 系统搭建, 各模块独立开发, 相互之间通过

TCP/IP 或 ADO 远程网络技术连接。各模块可分别被安装于变电站或调度中心的不同主机上, 实现在线监测系统软件的模块化和组件化, 以利于软件维护与升级。

3.1 通信服务器

上位机软件利用架设在服务器上的通信软件作为中间媒介, 用户应用程序和电压型监测装置作为客户端, 实现数据汇总与共享。通信服务器的软件功能分为以太网通信、定时管理、数据解析与打包和数据库管理 4 个部分。

通信服务器采用异步非阻塞通信方式和多线程模式, 使服务器一直保持在侦听状态, 以防客户端因网络不稳定而断连, 在侦听的同时还可通过 TCP/IP socket 实现一对多结构的数据传输以及其他操作。定时管理功能主要实现与电压型监测装置之间的链路测试、对时和报文重发机制。数据解析和打包功能根据 TCP/IP 型 Modbus 规约解析已接收数据以及打包待发送数据, 并将有用信息存储于全局变量。数据库管理功能负责连接数据库、查询参数, 以及存储装置状态信息、电压电流数据、录波指示等信息, 以供用户应用程序读取。用户应用程序对装置的遥控操作, 如下发电录波启动命令, 设置起动阈值、修改监测装置参数等, 先向通信服务器发起操作请求, 通信服务器作为中转站再转发给对应的电压型监测装置。

3.2 数据库

在线监测系统的实时性要求较高, 仅使用通用的关系数据库是不够的, 需利用实时数据库来保证数据采集与处理的响应速度^[11], 因此将数据库分为实时数据库和历史数据库两部分。数据库表单如图 5 所示, 实时数据库用于存储系统运行时的临时数据或经常变化的信息, 如定时更新的装置状态信息和线路电压电流波形数据等。为方便系统维护并保证实时数据库的运行效率, 实时数据库定期将数据转存到历史数据库的相应表单中并清空。历史数据库除了存储监测装置上传的历史波形数据之外, 还包括设备参数信息、故障诊断信息和用户操作信息。

数据库访问方式采用 ADO 访问技术, 其继承了 OLE DB 的高速性, 可以高速访问本地或远程的数据源。LabVIEW 软件远程访问数据库的步骤如下: ①调用 ADO 控件; ②连接数据源; ③生成并执行 SQL 命令; ④关闭数据源连接。

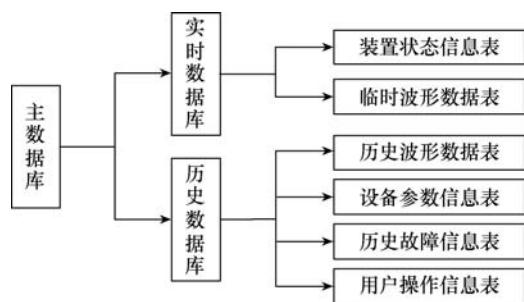


图 5 数据库表单

3.3 用户应用程序

用户应用程序负责实时显示、在线控制、故障告警等人机交互任务。软件功能结构如图 6 所示，主要包括系统管理、设备管理、通信管理、实时监测、历史查询、故障分析等 8 个部分。

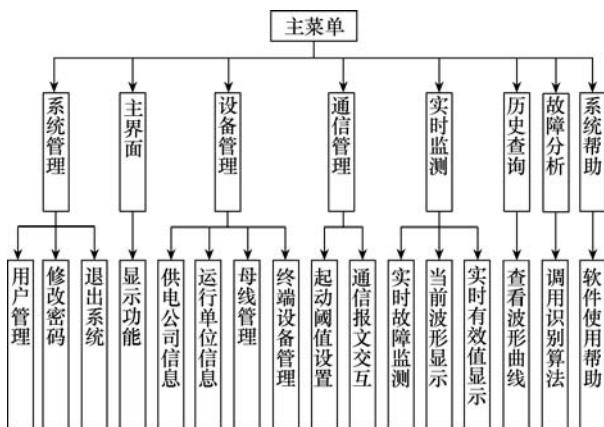


图 6 用户应用程序功能结构

操作人员可通过用户应用程序向各个监测装置下发命令，如查询当前母线电压或馈线电流、修改电压型监测装置起动阈值等。用户应用程序定时读取实时数据库的波形数据表，若出现新的故障波形，立即调用 Matlab Script 中的识别算法，以波形数据为输入量，故障类型作为输出量，调用结束后弹窗显示诊断结果并发出告警信号。同时将历史故障诊断数据及操作日志存储到数据库，以供后期查询研究。

4 故障类型识别算法

一套完整而有效的配电线路故障在线监测系统关键技术在于能否准确区分故障类型，以便故障排查。配电网线路的故障类型较多，本系统主要研究单相接地、两相接地、两相短路、三相短路等 4 种故障类型的识别。

4.1 算法流程

故障类型识别算法的流程如图 7 所示。首先提

取母线三相电压、母线零序电压和主变低压侧三相电流等 7 个故障波形的故障前一周波和故障后两周波作为输入样本，利用希尔伯特-黄变换（hilbert-huang transform, HHT）与带通滤波算法构造故障波形的时频矩阵，并对其进行 SVD 以获取特征量，输入到多级 SVM 进行训练和分类识别。

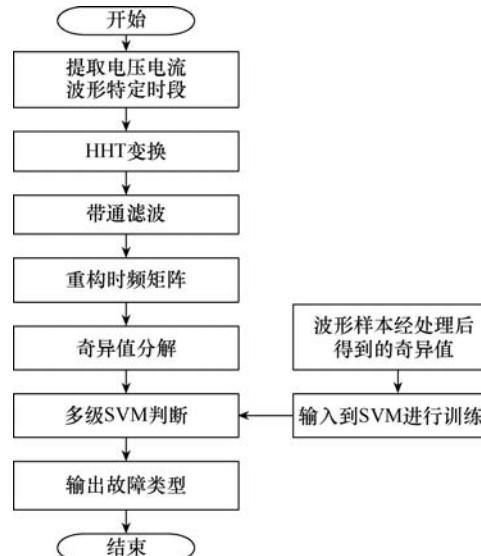


图 7 故障类型识别算法流程图

4.2 基于 HHT 带通滤波的时频分解

HHT 主要分为经验模态分解（empirical mode decomposition, EMD）和 Hilbert 变换两部分^[12]。首先采用 EMD 将各个故障波形信号分解为若干个频率成分单一的固有模态函数（intrinsic mode function, IMF）分量，接着对 IMF 分量进行 Hilbert 变换，可得对应的二维 Hilbert 能量谱。利用带通滤波算法将能量谱图等区域划分为 m 个子频带并重构，得到表征各个原始信号特征的时频矩阵，即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， n 为采样点数， a_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$) 为各个子频带波形的数据点。

\mathbf{A} 的行表示故障波形经 HHT 带通滤波后各个子频带的重构波形数据，列表示故障波形的采样时刻。时频矩阵 \mathbf{A} 完整地表现了故障波形在各个子频带上的时频特征，按频带分离信号，有利于特征量的提取，并且滤去高频噪声，增加信号可比性^[13]。

4.3 特征量提取

根据 SVD 理论^[14]，对式 (1) 的时频矩阵 \mathbf{A} ，

必定存在 2 个正交矩阵 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 以及一个对角矩阵 \mathbf{D} 满足下式：

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{U}^T \\ \mathbf{D} = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_k, 0, \dots, 0\} \\ k = \text{rank}(\mathbf{A}) = \min(m, n) \end{cases} \quad (2)$$

式中， λ_i ($i=1, 2, \dots, k$) 为矩阵 $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ 的特征值， $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{k-1} > \lambda_k > 0$ ， k 为奇异值阶数，rank 为求 \mathbf{A} 的秩。

每个故障波形对应的时频矩阵 \mathbf{A} 经 SVD 后得到 k 个奇异值，其中非零奇异值的个数代表时频矩阵 \mathbf{A} 中包含不同特征模式的数量，其值的大小代表相应特征模式在总模式中所占比重，表征故障波形的特性。

对大量故障波形 SVD 后发现，各个故障波形的奇异值在第 5 阶之后基本为 0。因此，统一选取各个故障波形的前 5 个奇异值作为配电网线路故障类型识别的特征量。奇异值作为稳定的矩阵代数参量，兼具良好的鲁棒性和泛化能力，对配电网线路多而杂的故障情况能够表现出较强的适应性。

4.4 多级 SVM 分类算法

SVM 是在统计学习理论基础上发展起来的一种学习机器，根据结构风险最小化准则，以最大化分类间隔构造最优分类超平面来提高其泛化能力，较好地解决了非线性、高维数、局部极小点等问题^[15]。

SVM 算法主要针对二元问题，因此采用 3 级 SVM 区分上述 4 种故障类型，实现自上而下的逐级识别^[16]。多级 SVM 的二分树结构如图 8 所示，输入样本为从故障电压电流波形提取出的特征量。SVM1 可以区分两类故障，根据故障时两相及两相以上是否出现大电流，将两相接地、两相短路和三相短路归为一类，单相接地视为另一类。SVM2 根据是否接地这一特征，将两相接地和不接地的相

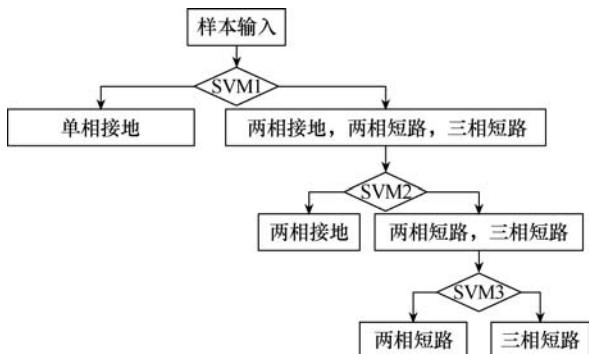


图 8 多级 SVM 二分树结构

间短路故障区分开。SVM3 则依据两相短路和三相短路时相电压和相电流的对称性区分这两种故障。

5 实验验证

5.1 实验平台

利用实验室搭建的 0.4kV 配电网物理仿真系统，验证在线监测系统的可行性和故障类型识别效果。物理仿真系统依据相似性原理，将 10kV 系统中的各个元件用缩小容量的物理模型元件替代，阻抗模拟比为 1，电压模拟比和电流模拟比为 10:0.38，所带负荷均为纯阻性负载，系统接地方式可选择不接地或经消弧线圈过补偿接地^[16]。物理仿真系统的主接线如图 9 所示，其中，V1 为电压型监测装置，安装在母线处，C₁—C₆ 为电流型监测装置，安装在变压器低压侧出口处和各馈线首端，编号 F₁—F₆ 表示实验设置的故障点。

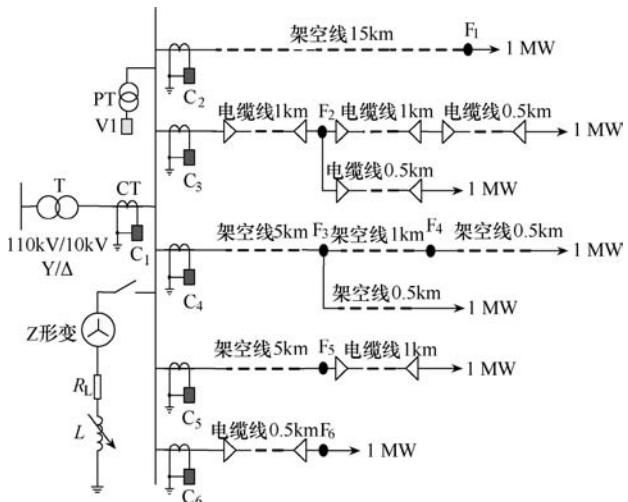


图 9 配电网物理仿真系统主接线

5.2 波形分析

为验证在线监测系统的可行性以及分析故障波形特征，采集 F₅ 故障点发生 4 种故障时的母线三相电压、零序电压和变压器低压侧三相电流波形，波形样本分别如图 10 至图 13 所示。每个波形信号长度为故障前一周波和故障后两周波，故障初相角为 90°，故障过渡电阻为 0，系统中性点不接地。4 种故障类型的相别分别为 AG、BCG、BC 和 ABC。

在中性点不接地系统中，单相接地故障与多相故障的区别在于多相故障时的故障相电流明显增大，而单相接地时线电压仍接近对称，故障电流变化趋势不明显。接地故障与相间短路故障之间最大的区别是零序电压的大小，其原因在于接地故障的

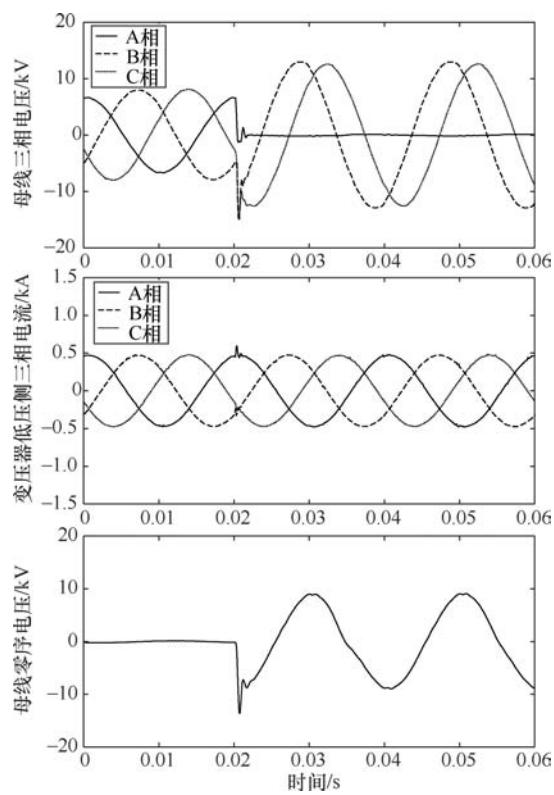


图 10 单相接地故障的电压和电流波形

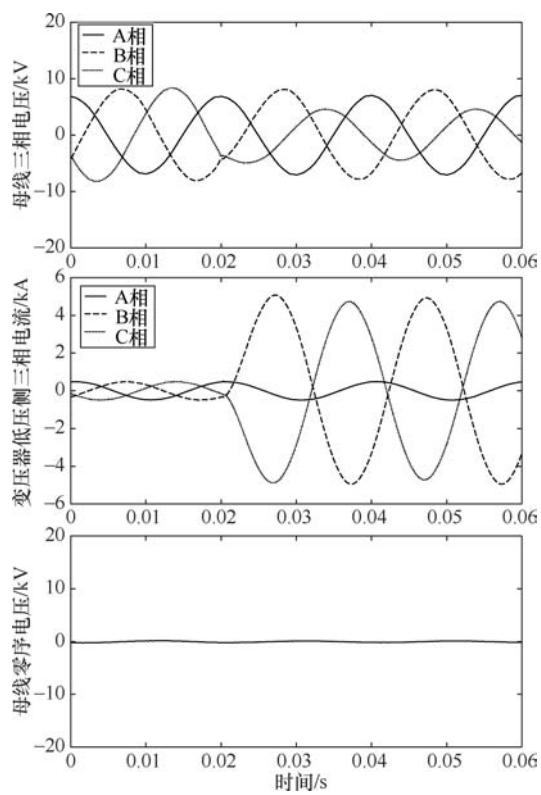


图 12 两相短路故障的电压和电流波形

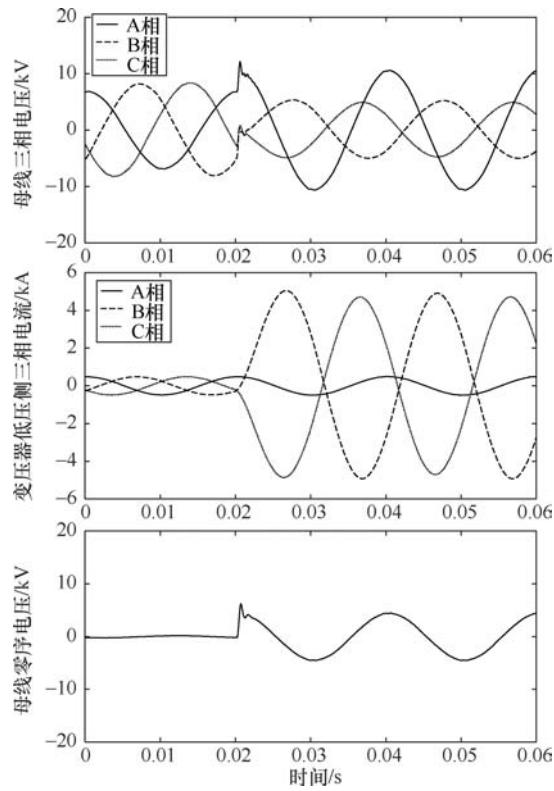


图 11 两相接地故障的电压和电流波形

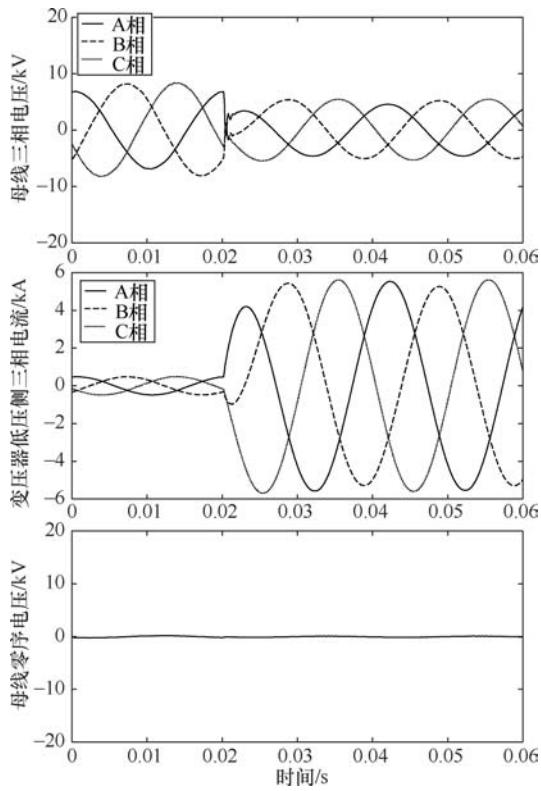


图 13 三相短路故障的电压和电流波形

接地相电压跌落，与非接地相电压幅值差异明显，零序电压随之升高。而发生相间短路故障时，故障点不接地，零序没有通路，因此零序电压为零。两相短路与三相短路的零序电压皆为 0，两种故障之间的区别主要体现在故障后的三相电压和三相电流对称与否。三相短路属于对称故障，故障后的三相电压和三相电流基本对称。而两相短路为不对称故障，故障相电压跌落、非故障相电压基本不变，线电压呈不对称现象，影响负荷供电，以致三相电流不对称。

线路发生故障时，在线监测系统能够及时起动录波并且采样同步。4 种故障波形样本的特征明显，与实际配电网发生故障时所表征的特性基本相同，说明本系统的采样精度满足故障类型识别算法的分类要求。可将故障前后的三相电流幅值变化、零序电压幅值大小、三相电压和三相电流是否对称作为 4 种故障类型的分类特征。

5.3 识别效果

综合考虑故障位置、故障电阻、故障初相角、故障相别等诸多因素的影响，对物理仿真系统进行大量实验，通过在线监测系统获取 4 种故障类型的波形样本。将所得样本按故障点位置分成训练样本和测试样本，两类样本选取不同的故障位置，来验证算法识别的正确率和适应能力。

训练样本选自物理仿真系统中 F_1 、 F_2 、 F_6 三个故障点发生故障时的波形数据，样本分布情况见表 1。

表 1 训练样本分布情况

故障类型	故障位置	故障电阻/ Ω	故障初相角/°	训练样本数
单相接地	F_1 、 F_2 、 F_6	0、100、200	81	81
两相接地		0		27
两相短路		0、45、90	27	
三相短路				7

表 2 为算法的测试样本和测试结果，样本选自 F_3 、 F_4 、 F_5 故障点发生故障时的波形数据。由表可知，多级 SVM 的平均识别率为 94.51%，总体保持在 85% 以上，其中三相短路故障的识别正确率较低，其原因是物理仿真系统线路较少，三相短路的训练样本不足，可通过增加样本数量提高对该故障的识别正确率。

表 2 测试样本和测试结果

故障类型	故障位置	故障电阻/ Ω	故障初相角/°	测试样本数	识别正确率/%
单相接地	F_3 、 F_4 、 F_5	0、100、200	0、45、90	135	94.07
两相接地		0		42	97.62
两相短路		45	97.78		
三相短路				15	86.67

6 结论

中压配电线故障在线监测与识别系统结合监测装置、通信传输技术、上位机软件和故障类型识别算法实现线路故障监测与故障类型识别。经配电网物理仿真系统测试，在线监测系统运行稳定可靠，线路发生故障时能够正确录波并识别故障类型。本系统具备完善的实时数据采集与界面显示功能，算法识别效果较好，适应能力强，在各种故障条件下皆能实现对 4 种故障类型的快速准确识别，为开展单相接地故障选线、故障定位和故障排查的工作奠定了基础。

参考文献

- [1] 岑建福, 伍燕咏. 10kV 配电线路实时监测及智能分析系统的研究开发[J]. 电气技术, 2012, 13(4): 57-58.
- [2] 姚陈果, 孙才新, 米彦, 等. 配电网过电压在线监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2004(9): 74-76.
- [3] 董迪, 齐郑, 杨以涵. 基于 ARM 技术的小电流故障选线装置[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 64-68.
- [4] 陈忠仁, 张波. 基于小世界网络模型的补偿电网单相接地故障识别与选线[J]. 电力系统保护与控制, 2013(3): 86-90.
- [5] 高作毅, 艾玲, 张占龙. 配电线路运行状况分布式监测系统[J]. 电气自动化, 2014(2): 81-83.
- [6] 王晨, 吴俊勇, 图尔荪·依明, 等. 基于无线通信的配电网单相接地故障定位系统及其动模实验[J]. 电网技术, 2014(8): 2280-2285.
- [7] 郑泽胤, 蔡晓榆, 王文祝, 等. 配电网馈线故障分布式监测系统研制[J]. 电器与能效管理技术, 2016(13): 46-51.
- [8] 艾建红, 洪新春, 余银钢. MXJD 单相接地故障管理系统[J]. 电气技术, 2014, 15(1): 124-125.

(下转第 90 页)