

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2016.02.009

基于 PSCAD 故障数据的数字继电保护测试仪设计

穆石磊¹, 刘建锋¹, 江玉蓉¹, 周妮娜²

(1. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海松江电力公司 运检部, 上海 201600)

摘要:介绍了继电保护测试仪的原理和软硬件开发过程. 该装置下位机硬件采用 ARM 嵌入式结构实现整体控制和数据处理; 软件采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式实时操作系统对系统任务进行管理. 分析了现有继电保护测试仪稳态和暂态数据生成方法的优缺点, 在此基础上提出了一种结合 PSCAD 仿真软件搭建仿真模型, 并通过解析 PSCAD 输出文件作为故障数据的新方法. 最后, 通过将还原波形与 PSCAD 波形对比定性分析和作差定量分析, 验证了本方法的可行性.

关键词:继电保护测试仪; 变电站; 嵌入式系统; 故障数据; PSCAD 波形

中图分类号: TM774

文献标志码: A

文章编号: 1006-4729(2016)02-0145-06

Design of Digital Relay Protection Tester Based on PSCAD Data

MU Shilei¹, LIU Jianfeng¹, JIANG Yurong¹, ZHOU Nina²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Operation Department, Shanghai Songjiang Electric Power Supply Company, State Grid, Shanghai 201600, China)

Abstract: The principle of digital relay protection tester, hardware and software development process are described. The hardware of the system is designed by ARM + DSP embedded structure and data processing; the software uses $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ embedded real-time operating system to manage the system tasks. The advantages and disadvantages of steady-state and transient data generation methods are analyzed, which are used in existing digital relay protection tester. On the basis of these methods, a new method is proposed and PSCAD simulation model is built by combing substation. Then, PSCAD output file and treating are analyzed as the fault data. Finally, qualitative analysis is carried out by comparing the restored wave with PSCAD wave and quantitative analysis is completed by subtracting in order to validate the feasibility of this method.

Key words: digital relay tester; substation; embedded system; fault data; PSCAD wave

随着 IEC61850 标准在电力行业的推广, 变电站的数字化程度得到了飞速发展. 基于 IEC61850

的数字化继电保护装置的二次信号有别于传统变电站, 具有网络化、数字化的特点^[1]. 在传输过程

收稿日期: 2015-09-02

通讯作者简介: 穆石磊 (1988-), 男, 在读硕士, 江苏阜宁人. 主要研究方向为电力系统继电保护. E-mail: 523086444@qq.com.

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目 (13DZ2251900).

中,其二次信号经过数字编码后通过光纤进行传输.数字变电站的过程层使用电子式互感器(ECT/EVT)代替传统变电站的电磁式互感器,其输出信号通过合并单元直接输出数字量,并通过光纤以太网传送至保护装置.间隔层的保护装置经过运算处理后,将输出数据下发至过程层智能终端等设备,最终实现对一次设备的保护^[2-3].数字继电保护装置的输入输出都是数字量,其测试项目、方法与传统设备的测试都有很大区别.测试仪也与传统微机保护测试仪不同,具有光纤通信接口,其输出信息符合 IEC61850 标准^[4].

数字式继电保护测试仪用于智能变电站继电保护装置的功能测试,要能够模拟电力系统故障发生时的故障数据信息,因此故障数据的生成是测试仪的关键技术之一.通过分析现有的故障数据生成方式,本文提出了一种解析 PSCAD 输出文件的故障数据生成方式.

1 测试仪原理及组成

1.1 测试仪原理

数字化变电站中,数字继电保护装置接收合并单元输出的 SV 采样值信号,并向智能终端送出 GOOSE 开关量信号.对继电保护装置测试时,数字继电保护测试仪替代合并单元发送 SV 采样值信号,同时能接收保护发出的 GOOSE 信号,从而实现对保护装置的闭环测试^[5].

1.2 测试仪组成

数字继电保护测试仪由上位机和下位机两个部分组成.下位机是基于微处理器的嵌入式系统,主要实现对数据的打包发送和解包接收功能;上位机软件是在 Windows 平台上开发的,主要实现数据的建模、映射、配置等功能.

1.2.1 下位机硬件设计

测试仪发送的 SV 采样值信号中包含多路电压、电流值,其实时性要求较高.下位机主控芯片选用 NXP 公司的 LPC1766 微处理器,该处理器是一款低功耗、32-bit 基于 ARM Cortex-M3 核的高性能处理器,可实现最高 100 MHz 的 CPU 操作频率,满足信号处理的实时性要求.该处理器自带 10/100M MAC 控制器,可以通过 RMI 接口外接 PHY 芯片和网络变压器实现以太网接口电

路^[6],节省了开发成本和时间.硬件整体结构图如图 1 所示.

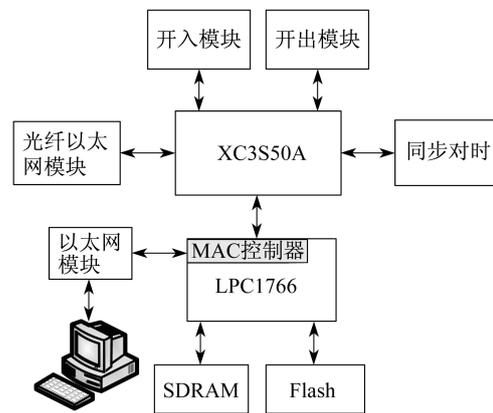


图 1 硬件结构示意图

1.2.2 下位机软件设计

ARM 程序流程图如图 2 所示.

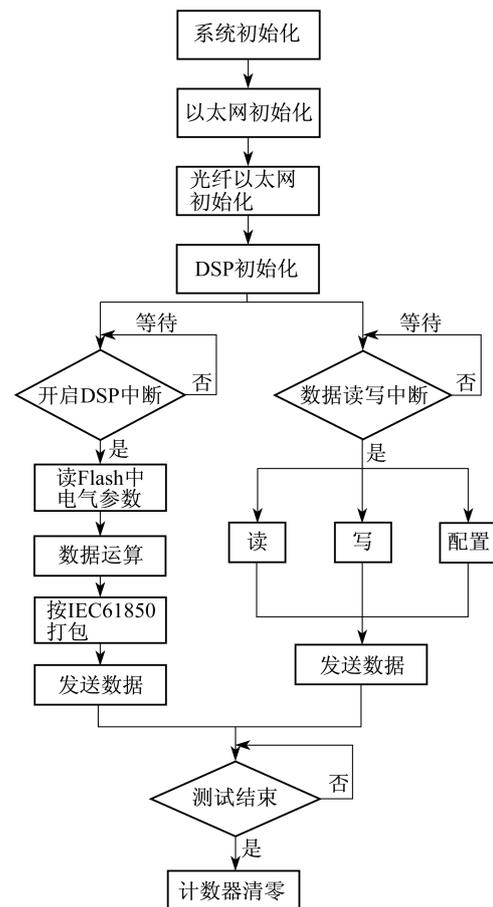


图 2 ARM 程序流程图示意

ARM 主控制器软件实现的功能复杂并且需要处理的任务繁多,因此本系统采用基于 $\mu\text{C}/\text{os} - \text{II}$ 的嵌入式实时操作系统对各个任务进

行管理。 $\mu\text{C}/\text{os-II}$ 用ANSIC语言编写,能够在不同构架的微处理器使用,便于移植、剪裁,其最多可以管理64个任务^[7],足以满足本工程设计的需要。

LPC1766主控制器软件主要实现3个功能:与DSP和上位机通信;把上位机下送的数据按照IEC61850格式打包,并通过以太网发送给继电保护装置;接收继电保护装置输出的GOOSE信号,并传送至上位机。程序移植时需要分配各个任务的优先级,从而保证系统的最优。

2 上位机软件设计

上位机软件是在Windows平台上开发的。该软件主要由人机界面、SCL文件解析、故障数据建模、通信等几大功能模块组成。故障数据建模是测试仪关键技术之一,本文在现有故障数据生成模式基础上做了改进性设计。

2.1 人机界面

上位机人机界面是基于LabVIEW软件开发的,其编程方法与计算机文本语言编程方法不同。该软件使用图形化编辑语言(G语言)编写程序,以产生框图的形式展现程序,给程序开发、阅读带来方便,并加快程序开发进程^[8]。同时,LabVIEW集成了各种应用所需的信息处理工具,极大地方便了开发用户。开发时可以通过调用不同的工具包和接口函数为上位机界面提供底层服务。

2.2 SCL文件解析

上位机软件中需嵌入MSXML软件接口来解析XML语言,开发时需要在此基础上实现对SCL文件的解析。工程测试中,测试人员导入厂家提供的SCL文件便可获取装置的相关配置信息。

2.3 故障数据建模方式

继电保护测试仪的主要功能是模拟电力系统故障时的数据,从而检验继电保护装置的性能。测试时,测试仪可以输出稳态数据做定值校验,也可以根据预先设定的故障数据完成功能测试。

目前测试仪稳态数据一般由库函数的标准正弦函数产生,该数据只能用于保护装置的定值校

验。故障时的暂态数据,有两种方式生成:一种是通过输入基波和各次谐波的幅值、步长等参数,按照算法计算形成故障数据;另一种是通过动模或真实电力系统的故障录波文件来获取故障数据^[9-10]。这种测试方法得到的是真实的电力系统故障数据,理论上说这是测试继电保护装置性能的最佳方法,但是从实际情况考虑,该方法存在一定的局限性。

(1)只能进行保护装置的通用性测试。因动模或实际系统的限制,录波文件不能提供有针对性的故障数据,也就不能进行特定网络保护功能的测试。

(2)不能进行复合型故障测试。测试仪再现的故障录波文件是针对故障情况下某元件或者线路的单一故障数据,无法完成复合型故障、发展型故障的测试。

本文的方法是利用PSCAD对特定的保护装置构建针对性的电力系统网络,设置故障并生成故障数据,然后通过测试仪打包成IEC61850格式的数据,发给保护装置完成测试。这种方法灵活方便,可任意改变电力系统的结构。通过上位机程序设置,可以实现对发展型故障的测试。

3 基于PSCAD故障数据生成

针对现有的故障数据生成模式,本文提出了一种通过解析PSCAD(Power Systems Computer Aided Design)输出文件的故障数据生成模式。

3.1 PSCAD软件介绍

PSCAD软件是世界上广泛使用的电磁暂态仿真软件。PSCAD采用时域分析求解完整的电力系统及微分方程(包括电磁和机电两个系统),结果非常准确。它允许用户在一个完备的图形环境下灵活地建立电路模型,进行仿真分析,仿真时用户可以改变控制参数,直观地看到各种测量结果和参数曲线。

3.2 通用性测试

为了满足对保护测试要求不高场合的应用,测试仪上位机软件延续传统的设计方式。稳态数据还是根据上位机界面设定参数,通过以太网传送给下位机。下位机根据算法计算出各采样点的数值后发送给保护装置。

3.3 针对性测试

3.3.1 针对线路或者元件测试

基于 PSCAD 故障数据生成法最突出的优势是:可以结合现场保护安装情况搭建电网络模型,生成针对性故障数据,尤其是在电力系统暂态仿真方面更为突出.测试时,在装好 PSCAD 软件的上位机电脑上,根据变电站电气接线和元件参数搭建好相应的仿真模型.测试人员首先根据保护测试项目建立相应的工程文件,然后在保护所在的位置设置相应波形输出,从而保证仿真后有波形数据输出.

在 PSCAD 中可以对采样频率等参数进行设置,其输出数据是以浮点型格式保存在相应的路径文件中.软件开发时,在上位机设计相应的操作界面,在底层编写接口程序.软件解析 PSCAD 输出文件后将数据送给下位机,下位机接收数据后将其暂存在 Flash 中.当上位机发出测试命令时,ARM 处理器直接从 Flash 中读取数据,然后按照 IEC61850-9-2 的格式直接打包发送给继电保护装置.

3.3.2 复合型故障测试及单步测试

基于 PSCAD 故障数据生成方式不但可以对某线路或元件做针对性测试,而且可以做复合型故障测试.比如测试过电流线路保护装置时,可以通过 PSCAD 软件搭建所测试的网络,在保护安装处设置测量点,以便获取故障数据.通过程序控制做区外转区内的复合型故障模拟,并将获取的故障数据文件存储.测试时通过下位机将故障数据打包成 IEC61850 数据报格式发往被测装置,完成复合型故障测试.还可以在上位机界面通过数据传送步长、采样点数、测试起止点等参数设置,调整数据的整体传输速率.当传输速率较慢时,相当于程序的单步调试,可以检验保护装置的算法设计,以及精确响应时间,这将对在研装置算法的优化带来极大的便利.

4 实验验证

本文通过动模实验来验证该方法的可行性.实验利用上海电力学院动模实验室的 110 kV 智能变电站系统.实验中首先根据测试需要在动模平台搭建一个具有发、输、配的电力网络,然后根据电力网络结构和系统参数在上位机 PSCAD 软件中搭建相应的电力网络仿真模型.在仿真模型

中对线路做单相接地、两相短路、两相接地、三相接地 4 种短路实验.仿真时需保证输出数据每个周波 80 个采样点,将 PSCAD 的仿真输出步长设定为 250 μs ;同时为了避免处理验证的数据量过大,实验中短路时间设置为 0.5 s.仿真结束后,上位机软件将仿真数据加载打开,通过下位机光纤传送给继电保护装置.保护装置收到故障数据后根据预定故障模式断开线路.

4.1 定性分析验证

为了更直观地看出处理后的数据和原始数据的相似度,将下位机发送给继电保护装置的数据通过逐个描点方式进行波形再现,然后与 PSCAD 输出的波形相对比,以此来验证数据处理方法的正确性.为避免图形累赘,以单相接地短路为例,PSCAD 仿真波形和测试仪输出数据再现波形分别如图 3 和图 4 所示.

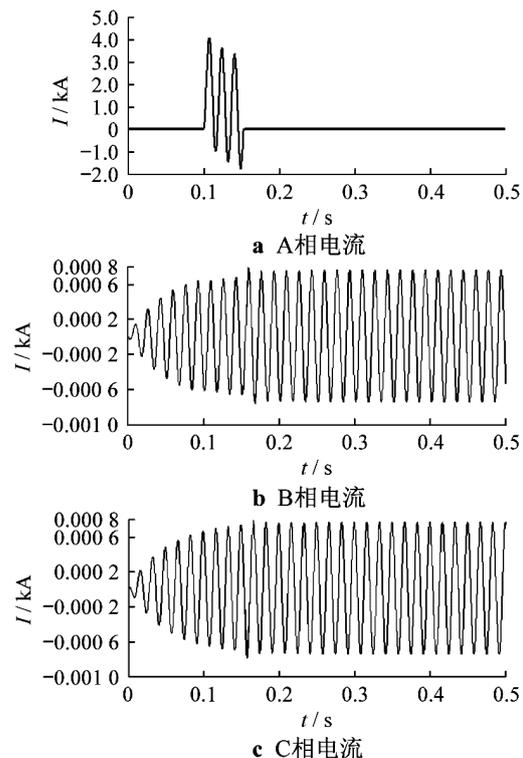


图3 PSCAD 仿真波形

通过对比图 3 和图 4 可以发现,PSCAD 和数据再现的波形从形状和趋势是一样的.

4.2 定量分析验证

为了满足工程精度的要求,本文从定量的角度来验证该方法的可行性.将实验中测试仪输出

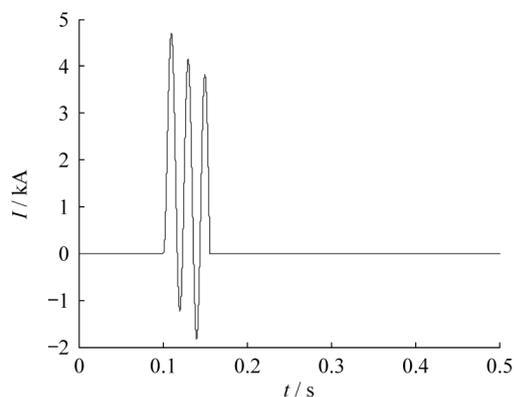
的数据和 PSCAD 生成文件中的故障数据按式 (1) 进行作差验证.

$$P = \left| \frac{a_{ij} - b_{mn}}{b_{mn}} \right| \times 100\% \leq K \quad (1)$$

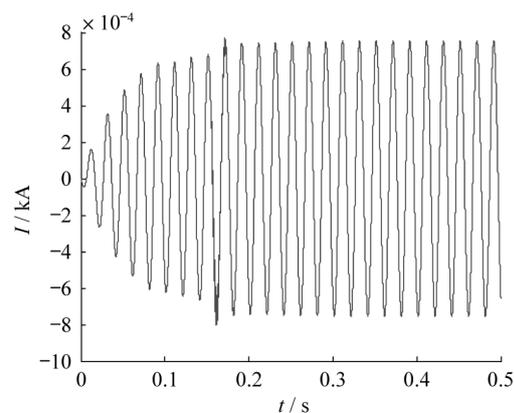
式中: P ——误差率;

a_{ij}, b_{mn} ——测试仪和 PSCAD 故障数据元素;

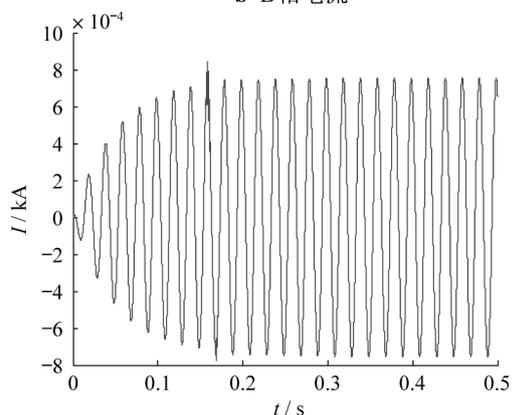
K ——工程允许的误差范围.



a A相电流



b B相电流



c C相电流

图4 测试仪输出数据再现波形

由于数据量过大,本文任意列出其中一个周波的数据量.具体数据值如表1所示.根据

IEC61850 的标准,每个周波需采样 80 个点,限于篇幅,表中数据按每隔 4 个提取 1 个采样值的方式列出.表 1 中数据保留 11 位有效数字(PSCAD 和测试仪中数据保留 14 位有效数字),但是对误差计算影响可以忽略不计.经过作差后发现误差都在 0.1% 以内,可以认为该误差符合工程要求.

通过定性和定量分析后,可以认为基于 PSCAD 生成的故障数据经过 ARM 处理后是符合要求的.测试时按照 IEC61850 固定的格式打包后发给保护装置做保护测试能够满足工程需要.

表1 作差数据

个数	a_{ij}	b_{mn}	P
1	-.4544503687E-05	-.4543641235E-05	0.01
2	.71921159035E-05	.71951654424E-05	0.04
3	.23126977155E-04	.23113465412E-04	0.05
4	.39241296637E-04	.39223256565E-04	0.04
5	.55372635061E-04	.55331345452E-04	0.07
6	.71424946009E-04	.71431454515E-04	0.09
7	.87409566754E-04	.87414546455E-04	0.05
8	.10335051133E-03	.10321545444E-03	0.01
9	.11920746152E-03	.11964564541E-03	0.03
10	.13483644962E-03	.13462145424E-03	0.01
11	.15007590250E-03	.15031321212E-03	0.01
12	.16482497424E-03	.16464612544E-03	0.01
13	.17908249441E-03	.17962325646E-03	0.03
14	.19287023235E-03	.19232213155E-03	0.03
15	.20615490318E-03	.20632365656E-03	0.08
16	.21881076589E-03	.21862623413E-03	0.08
17	.23068888209E-03	.23045642121E-03	0.01
18	.24169564569E-03	.24185656231E-03	0.06
19	.25182994200E-03	.25132326561E-03	0.02
20	.26112017824E-03	.26131415456E-03	0.07

5 结 语

为了提升测试仪的性能,使其输出的故障数据波形更接近实际情况,本文提出了一种结合 PSCAD 仿真软件的数字继电保护测试仪的设计方案.该设计不仅能对特定的保护装置产生针对性的故障数据,而且给保护装置的研发调试带来极大便利,具有工程实践意义.

参考文献:

- [1] 黄曙,陈炯聪,李晓朋,等.数字化变电站二次系统综合测试仪的研制[J].电力系统保护与控制,2010,38(24):195-

- 198.
- [2] 刘建锋,李开成,张昌华,等.基于ARM的电子式互感器合并单元的设计[J].电测与仪表,2008(4):49-52.
- [3] 何刚,胡宝,陈强林,等.OMICRON测试仪在数字化保护装置测试中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):130-135.
- [4] 冯硕,黄梅,李晓朋.基于IEC61850的光数字继电保护测试仪的研制[J].继电器,2008,36(8):23-25.
- [5] 巩秀芳.嵌入式电力系统多功能录波仪的设计与实现[D].北京:北京交通大学,2013.
- [6] 倪兆端,王延安.智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计[J].电力系统保护与控制,2014,42(10):119-204.
- [7] LABROSSE Jean J.嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ [M]. 邵贝贝,译.第2版.北京:北京航空航天大学出版社,2003:15-20.
- [8] 张春晓,汪祥兵,张华,等.基于LabVIEW的微机保护装置培训系统研究与实现[J].电力系统保护与控制,2009,37(17):110-115.
- [9] 蔡春雷,葛鑫,需俊杰,等.ComTrade格式数据文件的解析、显示及分析[J].冶金自动化,2009,35(2):18-24.
- [10] 张亮峰,欧阳帆,赵永生,等.COMTRADE录波文件格式解析及继电测试仪回放功能兼容性测试[J].湖南电力,2012,50(2):104-106.

(编辑 白林雪)

(上接第144页)

- [12] SHATTE Adrian, HOLDSWORTH J, LEE I. Mobile augmented reality based context-aware library management[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(1):2174-2185.
- [13] 陈灿鑫.增强现实系统中跟踪注册的关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [14] 康绍鹏.增强现实关键技术研究[D].沈阳:沈阳航空工业学院,2009.
- [15] YAN W D, AOYAMA S, ISHII H, *et al.* Development and evaluation of a temporary placement and conveyance operation simulation system using augmented reality[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2012, 44(5):507-522.
- [16] TSUJITA K, ENDO T, YAMAMOTO A. Application of augmented reality to nuclear reactor core simulation for fundamental nuclear engineering education[J]. Nuclear Technology, 2014(1):71-84.
- [17] BIAN Z, ISHII H, SHIMODA H, *et al.* Development of a tracking method for augmented reality applied to NPP maintenance work and its experimental evaluation[J]. Ieice Transactions on Information and Systems, 2007, 90(6):963-974.
- [18] MING-KUAN T, NIE-JIA Y. Using augmented-reality and mobile three-dimensional graphics techniques in relief work on radiological disaster sites[J]. Nuclear Technology & Radiation Protection, 2013, 28(3):332-340.

(编辑 白林雪)