

500 kV 线路微机保护仿真培训系统的开发

袁明军¹, 陈泗贞², 刘永强¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523120)

摘要: 为使继电保护工作人员在短时间内熟悉新型线路保护装置的使用及调试, 设计了基于定值比较法的 500 kV 线路保护仿真培训系统。提出面向实际装置的思想, 从装置的内部功能和外部特征两个方面完整地表达实际的装置, 实现了线路保护装置的电力系统动态模拟试验仿真及保护调试仿真。应用测试表明, 该系统具有很高的逼真度, 对于不同的故障, 线路保护仿真装置能正确动作。

关键词: 线路保护; 仿真培训; 定值比较法; 面向实际装置

Development of simulation training system for 500 kV line microcomputer-based protection

YUAN Ming-jun¹, CHEN Si-zhen², LIU Yong-qiang¹

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Dongguan 523120, China)

Abstract: A 500 kV line protection simulation training system based on quantitative comparison method is designed, aiming to let relay protection workers acquaint new line protection's application and test quickly. Real equipment oriented design idea is presented in this paper. The system reflects real equipments from internal function and external characteristics perfectly. It simulates line protection's power system dynamic analog laboratory and protection test. Actual applications indicates that the system has high fidelity, and line protection simulation can act correct when meeting different faults.

Key words: line protection; training system; quantitative judging simulation; real equipment oriented

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0101-05

0 引言

微型线路保护装置已经在国内各电力系统中得到广泛使用, 但由于其特有的复杂性, 供电企业对微机保护的使用和维护一直处于较低的水平。随着电力工业及仿真技术的发展, 人们对继电保护仿真培训系统的认识逐渐增强, 对仿真的逼真性、实用性、灵活性的要求也日益提高^[1]。

目前, 所有的继电保护仿真系统都不能完全地仿真继电保护装置^[2], 仿真系统实现的仅仅是部分功能或特性, 缺乏对继电保护装置整体性功能的仿真。例如文献[3]开发的以 RCS-901 为例的距离保护仿真软件; 文献[4]开发的继电保护装置动作逻辑的仿真系统; 文献[5]开发的以微机保护为基本建模单元的通用数据库模型, 等等。

继电保护仿真系统的仿真方法主要有两种: 定值比较法和逻辑比较法^[6-7]。逻辑比较法基于保护规

制, 实时性好^[8], 但在某些运行条件下仿真结果与实际情况有较大出入, 仿真的逼真性较差^[9]。定值比较法是将电力系统计算的电气量与整定值相比较而实现故障判别的仿真方法, 该方法与微机保护装置的保护原理类似, 逼真度高。

本文开发的基于实际装置的 500 kV 线路保护仿真培训系统采用定值比较法, 对某 500 kV 变电站线路保护柜的功能进行完整仿真。针对培训这一仿真目的, 引入模拟运行线路完成线路保护仿真装置的动态模拟实验测试, 引入继电保护测试仪仿真装置完成线路保护仿真装置的保护调试, 形成了集动模试验仿真及调试仿真为一体的仿真培训系统。该系统改进了以往的电力系统仿真只能显示简单的交互界面, 对动态、复杂画面内容表达能力欠佳; 操作方式和操作界面单一; 实时性不好^[10]等不足, 在逼真性、交互性、实时性等方面都有较好表现, 具有很高的实用价值。

1 系统整体结构

仿真系统由三部分组成：运行线路、保护柜、继电保护测试仪。运行线路与保护柜构成动模试验仿真平台，用于线路保护仿真装置电力系统动态模拟试验；继电保护测试仪与保护柜构成保护调试仿真平台，用于线路保护仿真装置定值校验测试。仿真系统的整体结构如图 1 所示。

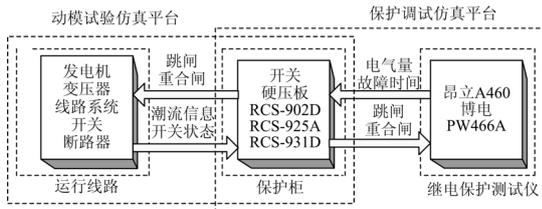


图 1 仿真系统结构

Fig.1 Structure of simulation system

运行线路：模拟一条典型的 500 kV 双回线运行线路，采用二分之三开关接线。

保护柜：模拟某 500 kV 变电站的微机线路保护柜。该保护柜的主要布置如下：RCS-931D、RCS-925A、RCS-902D、电源开关、切换开关等。

继电保护测试仪：模拟广东电网范围内普遍使用的昂立 A460 及博电 PW466A 继电保护测试仪。

2 仿真系统建模

2.1 运行线路模型

模拟运行线路用于完成线路保护仿真装置的电力系统动态模拟试验。本系统仿真的运行线路为 500 kV 电压等级，包含双回线，二分之三开关接线，如图 2 所示。

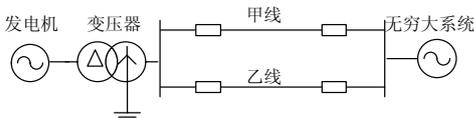


图 2 运行线路

Fig.2 Transmission lines

模拟运行线路的功能：电力系统运行方式选择（甲线、乙线同时运行或甲线退出乙线运行）；发电机、变压器、线路、系统等仿真线路参数的查询与修改；故障点设置；开关工作状态、保护动作状态、故障状态显示；潮流数据实时显示。

故障计算：1) 潮流计算。直接将发电机输出功率减半，作为支路功率；根据功率计算发电机机端电压和交轴暂态电势。2) 短路计算。假定发电机交轴暂态电势和系统电压不变，计算短路电流。

2.2 保护装置模型

保护模型是继电保护仿真系统的主要组成部分，也是仿真系统的重点和难点。基于定值比较法的保护模型根据输入的电气数据作出保护判断，动作特性不受运行方式的影响。

2.2.1 模型设计

微机线路保护装置的软件工作流程如图 3 所示。本文开发的微机线路保护装置（RCS-902D/RCS-925A/RCS-931D）依据此工作流程开发设计，对于不同的装置，其仿真流程一致，区别在于流程中各部分的具体实现不一样。仿真系统工作流程的功能设计如下：

- 1) 采样程序：对故障电压、故障电流、开关量等电气量进行采集；
- 2) 启动：启动判据的计算，根据是否满足条件进入正常程序或故障计算程序；
- 3) 正常程序：开关位置状态检查、交流电压断线检查、交流电流断线检查、重合闸充电等；
- 4) 故障计算程序：各种保护的算法计算、跳闸逻辑判断、事件报告、故障报告、波形整理；
- 5) 整组复归：清除临时标志、收回各种操作命令，保护装置返回到故障前的状态，为下一次保护动作做准备。

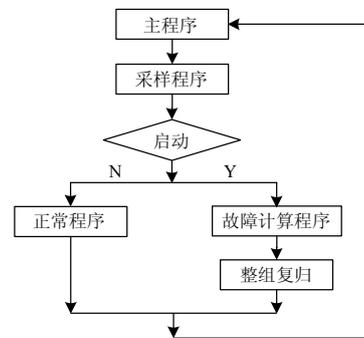


图 3 保护仿真流程图

Fig.3 Flowchart of protection simulation

2.2.2 关键问题

判断故障是否在保护的范围内是保护装置模型设计中的关键问题。本文设计的线路保护仿真装置对实际线路保护装置的动作逻辑及各保护算法进行仿真，使保护仿真装置能作出与实际装置一致的保护动作。在设计保护模型时，将线路保护装置各保护配置模块化处理，满足启动条件时进入相应的保护模块进行保护判断。实际微机线路保护装置的保护配置如表 1 所示。

表 1 保护配置

Tab.1 Configuration of relays

型号	配置
RCS-902D	纵联距离方向 纵联零序方向 工频变化量阻抗 三段接地和相间距离 延时段零序方向过流 反时限零序方向过流 自动重合闸
RCS-925A	过压保护 远方跳闸的就地判别
RCS-931D	分相电流差动 零序电流差动 工频变化量距离 三段接地和相间距离 延时段零序方向过流 反时限零序方向过流 自动重合闸

保护为例,介绍线路保护仿真装置保护模块的开发。

1) 保护动作逻辑

保护动作逻辑是保护模块的基础,根据测量比较元件输出逻辑信号的性质、先后顺序、持续时间等,判定故障的类型和范围,最后确定是否发出跳闸、重合闸、不动作等信号。除启动元件和延时元件外,保护动作逻辑可视为一个二值系统的组合,即由这些二值元件的组合实现特定的功能^[4]。由此将保护动作逻辑加以简化,认为保护动作逻辑传递的主要是开和关的信号,即“0”和“1”的信号,这样保护动作逻辑就可以简化为一个二值系统^[11]。对保护动作逻辑仿真可简化为对该二值系统的分析仿真。

RCS-931D 的三段式接地和相间距离保护动作逻辑如图 4 所示。该保护动作逻辑由测量比较元件、开放元件、保护启动、压板投入等按照一定的逻辑(“与”、“或”、“非”等)并与延时元件配合而成。该仿真系统基于定值比较法,保护动作逻辑中的测量比较元件涉及电气量比较运算,具体计算见保护算法。

下面仅以 RCS-931D 的三段式接地和相间距离

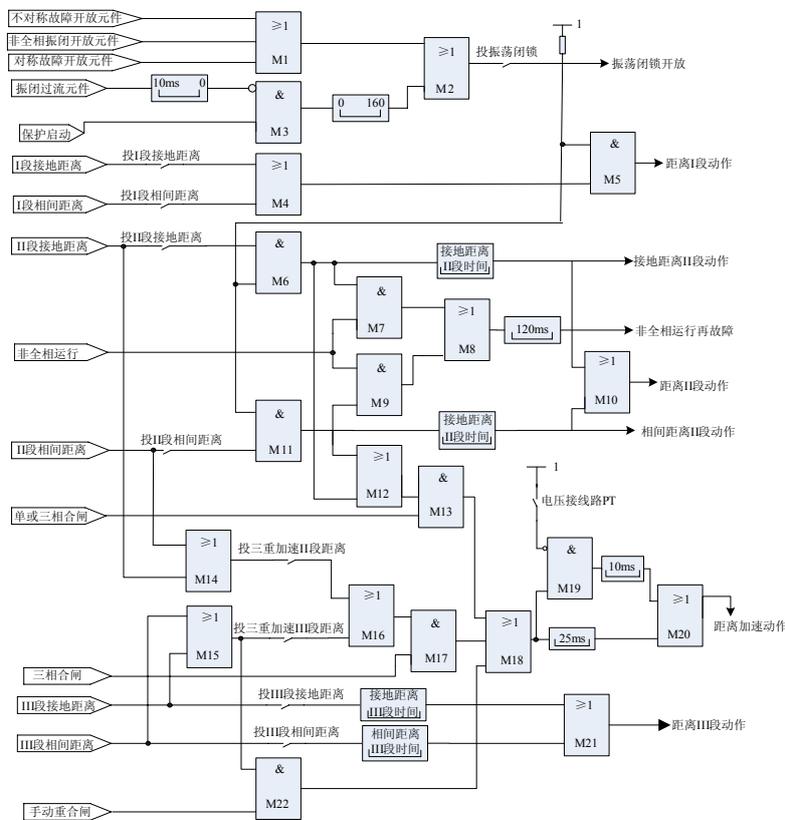


图 4 距离保护动作逻辑

Fig.4 Action logic of distance protection

2) 保护算法

采用定值比较法的保护算法的实现：通过输入的电气量与给定的值比较，根据比较结果，给出“真”、“假”、“0”、“1”性质的一组逻辑信号，从而判断保护是否应该启动。三段式距离保护，阻抗继电器由正序电压极化，对不对称短路有较大的保护过渡电阻的能力。其动作方程为： $-90^\circ < \arg(U_{op}/U_p) < 90^\circ$ ，其中： U_{op} 为工作电压， U_p 为极化电压。距离保护的算法通过计算输入电气量是否满足动作方程而给出“真”、“假”性质的逻辑信号，从而用于判断距离保护是否该启动。三段式距离保护各段工作电压及极化电压的算法如表2所示。

表2 保护算法

Tab.2 Protection algorithm

类型	工作电压	极化电压
I、II段接地距离	$U_{OP\phi} = U_\phi - (I_\phi + K3I_0)Z_{ZD}$	$U_{P\phi} = -U_{1\phi} \times e^{j\theta 1}$
III段接地距离	$U_{OP\phi} = U_\phi - (I_\phi + K3I_0)Z_{ZD}$	$U_{P\phi} = -U_{1\phi}$
I、II段相间距离	$U_{OP\phi\phi} = U_{\phi\phi} - I_{\phi\phi}Z_{ZD}$	$U_{P\phi\phi} = -U_{1\phi\phi} \times e^{j\theta 2}$
III段相间距离	$U_{OP\phi\phi} = U_{\phi\phi} - I_{\phi\phi} \times Z_{ZD}$	$U_{P\phi\phi} = -U_{1\phi\phi}$

参数说明： ϕ -A, B, C; $\phi\phi$ -AB, BC, CA; Z_{ZD} 为整定阻抗; K 为零序补偿系数; I_0 为零序电流; $U_{OP\phi}$, $U_{OP\phi\phi}$ 为工作电压; $U_{P\phi}$, $U_{P\phi\phi}$ 为极化电压; $U_{1\phi}$, $U_{1\phi\phi}$ 为记忆故障前正序电压; $\theta 1$, $\theta 2$ 为移相角。

2.3 继电保护测试仪模型

线路保护装置的保护调试通过继电保护测试仪来完成，本文设计的继电保护测试仪仿真装置依据各线路保护装置的调试大纲，模拟了如下试验项目：电压/电流、距离保护、零序保护、工频变化量保护、阻抗特性、阻抗继电器等。仿真的继电保护测试仪能完成表1所示的各保护的测试。

继电保护测试仪的各实验项目由如下模块成：

1) 参数设置模块：模拟实际装置的参数设置界面，如整定值、整定倍数、系统参数、开关量等参数设置。

2) 输出显示模块：试验过程中的电压、电流实时输出显示界面，如：矢量图、输出监视、历史曲线等。

3) 试验结果模块：整理试验结果，生成实验结果及实验报告。

4) 输出算法模块：测试仪的核心部分，测试结果是否正确的关键。本文设计的继电保护测试仪仿真装置模拟了实际装置的内部输出算法，具有与实

际装置一致的输出，可保证调试结果的正确性。

3 开发及应用介绍

综合考虑网络发布、执行效率、显示效果等因素，该仿真系统采用Flash CS4开发。Flash CS4是当前流行的动画制作软件，它把向量图的精确性和灵活性与位图、声音、动画、高级交互性融合在一起，能够创作出极具吸引力的动画效果，使培训效果事半功倍，且其制作的动画文件较小，适合网络发布。

本文开发的500 kV线路保护仿真系统应用于广东电网公司教育培训中心的线路保护远程培训系统中。通过与实际装置的对比表明该仿真系统具有极高的逼真度：

(1) 一致的操作界面。线路保护仿真装置及继电保护测试仪仿真装置具有与实际系统一致的操作界面，使用户有身临其境的感觉。该仿真系统对保护柜操作界面进行仿真，保护柜上的开关关合、压板投切、保护屏的小键盘等操作均与实际系统一致，且真实有效；继电保护测试仪仿真装置中的参数设置、图形显示、试验报告等界面也与实际装置一致。

(2) 一致的保护动作。针对不同的故障，线路保护仿真装置能正确动作。线路保护仿真装置像实际装置一样区分出动作边界，反向故障时能正确区分出方向。

(3) 一致的故障输出。仿真的运行线路的潮流计算无误，且满足实时性要求；继电保护测试仪仿真装置具备与实际系统一致的输出。

总体看来，该仿真系统在实用性、逼真性、灵活性等方面均有很好的表现，能满足培训的要求。

4 结语

本仿真系统采用面向实际装置的思想，以广东电网广泛使用的线路保护装置为研究对象，针对培训这一特殊目的，引入了继电保护测试仪仿真装置进行测试仿真，实现了真正意义上的现场运行仿真培训。该仿真系统具有界面友好、操作简捷、功能齐全等特点，适用于线路保护现场运行人员的仿真培训，对于其他的微机型继电保护仿真系统的开发也有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 贾宁, 常鲜戎. 调度员培训仿真系统(DTS)继电保护模块的开发[J]. 继电器, 2007, 35(23): 19-23.
JIA Ning, CHANG Xian-rong. Development of the simulation module about relay protection in dispatcher training simulator (DTS) [J]. Relay, 2007, 35(23):

- 19-23.
- [2] 邹贵彬, 高厚磊, 江世芳. 微机距离保护仿真系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2007, 29(7): 88-90. ZOU Gui-bin, GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang. Design and implementation of simulation system for microcomputer-based distance protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 29(7): 88-90.
- [3] 刘强, 蔡泽祥, 詹少伟, 等. 基于实际装置的距离保护动态仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 8-11. LIU Qiang, CAI Ze-xiang, ZHAN Shao-wei, et al. Dynamic simulation of distance protection based on real equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 8-11.
- [4] 李志兴, 蔡泽祥, 许志华. 继电保护装置动作逻辑的数字仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 97-101. LI Zhi-xing, CAI Ze-xiang, XU Zhi-hua. Digital simulation system of relay protection movement logic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 97-101.
- [5] 胡炎, 曹玉峰. 一种通用的继电保护数据库模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 61-65. HU Yan, CAO Yu-feng. A general protection database model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 61-65.
- [6] 钱华, 张良. 新一代地区电网DTS系统中的继电保护仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 72-75. QIAN Hua, ZHANG Liang. The new generation relay protection emulation of region electricity web in DTS[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(4): 72-75.
- [7] 孔艳, 袁启海. DTS中基于用户自定义的自动装置模拟[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(6): 36-37. KONG Yan, YUAN Qi-hai. The auto mechanism simulation bases on the user-defined in DTS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(6): 36-37.
- [8] 张旭, 张东英, 孙涛, 等. 基于逻辑判断法的继电保护仿真系统开发[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 53-56. ZHANG Xu, ZHANG Dong-ying, SUN Tao, et al. Development of relay protection simulation system based on logic judgment method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 53-56.
- [9] 崔鸿斌, 常鲜戎, 胡文丽. DTS系统中继电保护仿真实现方法的改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 94-97. CUI Hong-bin, CHANG Xian-rong, HU Wen-li. Improvement of the methods for implementing relay protection simulation in DTS[J]. Proceedings of the EPSA, 2006, 18(3): 94-97.
- [10] 王兴武, 常喜茂, 董青, 等. 基于Web的火电仿真培训系统研究及实现[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3091-3094. WANG Xing-wu, CHANG Xi-mao, DONG Qing, et al. Research and implement of web-based training system for thermal power plant simulation[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3091-3094.
- [11] 陈树柏, 左垵, 张良震. 网络图论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982. CHEN Shu-bai, ZUO Kai, ZHANG Liang-zhen. Network topology and its applications[M]. Beijing: Science Press, 1982.

收稿日期: 2009-06-25; 修回日期: 2009-07-26

作者简介:

袁明军(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为能源与动力系统中电力电子及其控制的应用; E-mail: yuanmj22@yahoo.com.cn

陈泗贞(1975-), 女, 工程师, 主要从事继电保护运行与维护方面的工作;

刘永强(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量监测及电力电子变流技术。

(上接第 74 页 continued from page 74)

- [7] 张红斌, 汤涌, 张东霞, 等. 负荷建模技术的研究现状与未来发展方向[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 6-9. ZHANG Hong-bin, TANG Yong, ZHANG Dong-xia, et al. Present situation and prospect of load modeling technique[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 6-9.

收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-12-14

作者简介:

汪永华(1963-), 男, 副教授, 高级工程师, 从事电气工程及其智能化方面的教学与研究;

王正风(1976-), 男, 高级工程师, 博士, 从事电力系统调度运行工作。E-mail:wzhengf@163.com