

基于 RTDS 的微机保护实时闭环数字仿真系统

周巍¹, 张沛超¹, 杨星星²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 苏州电力公司, 江苏 苏州 215005)

摘要: 传统仿真方式下建立的保护模型通常是离线、开环的, 无法满足对微机保护实时交互测试与研究的要求。分析了微机保护实时闭环数字仿真系统的意义, 说明其可以作为研究平台、事故分析平台、试验测试平台以及教学培训平台。提出了微机保护仿真系统的两种典型应用方式并分析了其优缺点。根据 IEC 61850 标准中对保护功能的划分方法, 开发了丰富的保护实时仿真组件; 根据 IEC 61131-3 标准, 以功能方框图方式构成保护系统; 将上述“软保护”系统嵌入到一次系统仿真模型中, 从而构成微机保护实时闭环数字仿真系统。在 RTDS 上的实际运行结果表明, “软保护”系统可在各种故障情况下实时、闭环、正确动作。

关键词: 微机保护; RTDS; 仿真系统; IEC 61850; 闭环测试

A real-time closed-loop digital simulation system for computer protections based on RTDS

ZHOU Wei¹, ZHANG Pei-chao¹, YANG Xing-xing²

(1. School Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215005, China)

Abstract: Traditional simulation models for computer protections are generally off-line and open-loop, so they fail to meet the need of real time testing as well as research for relay protection. This paper mainly analyzes the significance of the research for real-time closed-loop digital simulation system, indicating that this system can serve as a platform for research, fault analysis, experiment testing as well as education. It illustrates two typical application scenarios of the simulation system and discusses their strengths as well as limitations. According to the classification of protection functions by IEC61850 standard, the paper develops abundant real-time simulation components for protection. Finally, a functional-block diagram protection system based on IEC 61131-3 is developed and embedded in the RTDS, which forms a real-time closed-loop digital simulation system for computer protections. The “soft protection system” has been fully tested, which demonstrates its real time, closed-loop and correct operation based on RTDS.

Key words: computer protection; RTDS; simulation system; IEC 61850; closed-loop testing

中图分类号: TM77; TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0127-05

0 引言

长期以来, 人们在电力一次系统仿真方面做了大量研究, 但在保护等二次系统仿真方面的研究工作则相对较少。近年来, 由于高压直流输电技术和灵活交流输电技术不断引进电力系统中, 对电力二次系统数字仿真技术提出了更高的要求, 基于这方面的研究也逐渐得到了重视^[1-2]。但以上研究所建立的保护模型都是离线、开环的, 在仿真过程中一次系统不能实时接收来自保护的動作信号, 因而难以真实模拟保护动作后实际电力系统的运行情况, 同时也无法满足对微机保护实时、交互测试的要求。

本文利用 RTDS 强大的并行计算能力, 开发了

微机保护实时闭环仿真系统。首先根据 IEC 61850 标准中对保护功能的划分方法, 开发了完整的高压线路保护实时组件库; 然后根据 IEC 61131-3 标准, 以功能方框图方式构成保护系统; 最后, 将上述“软保护”系统嵌入到一次系统仿真模型中, 从而构成微机保护实时闭环数字仿真系统。

1 微机保护实时数字仿真系统

1.1 微机保护实时闭环仿真的作用

微机保护实时闭环仿真系统可用做多种分析、测试和研究平台。

a) 科学研究。利用数字仿真模型代替物理装置, 可以实现对保护行为的可视化、量化研究^[3],

克服物理装置的可扩展性差、可仿真的电力系统规模受装置自身的物理特性以及与其他元件的配合性能等诸多因素限制的缺点。一些可能的研究有：研究 FACTS 装置对保护系统的影响^[4]；研究交直流互联系统对保护动作行为的影响；研究同杆并架多回线对保护的影响；研究光学互感器对保护的影响^[5]，以及全数字化保护系统的研究^[6-10]；等等。

b) 事故分析。传统的保护系统都是“黑盒子”，若保护拒动，难以判断该保护离正确动作“有多近”；若保护动作，无从判断该保护离拒动“有多远”；若保护不正确动作，无从跟踪保护内部的动作逻辑和动作时序，这给电网事故后的保护动作行为分析以及追踪不正确动作的原因带来了很大的难度。微机保护实时数字仿真技术可以实现可视化、透明化、量化的事故回放与分析。图 1 为实时仿真技术下观测到的测量阻抗轨迹图，由图可以清晰直观地看出阻抗轨迹的运动变化情况，很大程度上实现了将继电保护装置由“黑盒子”变成“白盒子”。

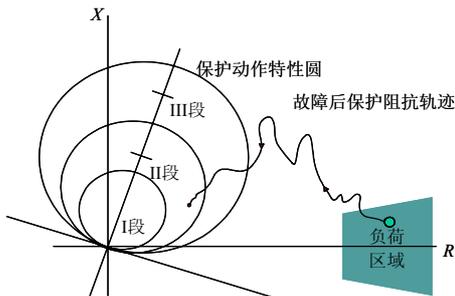


图1 阻抗轨迹图
Fig.1 Impedance locus

c) 试验、测试。新型保护装置在研发过程中与投运之前，必须对其进行大量的闭环测试，以确保保护装置本身具有良好的暂态性能。同时，还必须分析评测新装置与其他装置之间的配合性能、对不同电网情况的适应能力等。实时数字仿真系统用“软保护”代替“硬保护”进行试验、测试，系统配置灵活，大大减少了装置试验的场地占用和装置数量，可重复性强、测试效率高。

d) 教学、培训。以 RTDS 为代表的实时数字仿真系统具有友好的用户界面，在仿真过程中可以实现动态可视化信息交互。可以用最简单、直观的方式，告诉学习人员现代微机保护的原理，实现了教学、培训手段的突破。

1.2 两种应用方式

目前在利用 RTDS 对保护进行研究、测试时，保护皆采用实际物理装置。因此，现阶段 RTDS 主要起到“数字动模”的作用。采用基于 RTDS 的微机

保护实时闭环仿真系统后，可将保护系统以“软保护”方式嵌入到 RTDS 系统中。这样就有两种微机保护仿真方式。

方式 A：数模混合仿真，如图 2 (a) 所示。图中，被测保护采用物理装置，而与之配合的其他保护则采用数字仿真。

方式 B：完全数字仿真，如图 2 (b) 所示。由图可见，不但一次系统，而且所有保护装置皆采用数字仿真。实现了一、二次系统实时、闭环的纯数字仿真。

上述仿真方式都具有数字仿真系统体积小、建设周期短、配置灵活多变、可重复性强以及仿真结果真实可靠等优点。

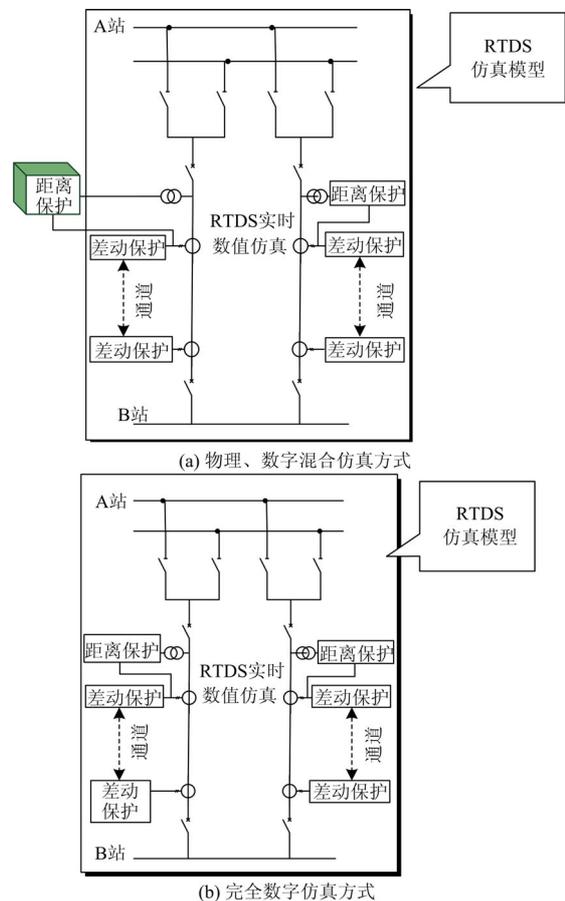


图2 典型应用方案

Fig.2 Typical application scenarios

2 系统结构

2.1 软件结构

一套完整的微机保护实时闭环仿真系统从软件架构上可以分为：一次子系统（含CT、PT模型）、故障设置子系统、保护子系统、跳闸子系统、重合

闸子系统, 基本结构如图3所示。其中故障设置子系统可以触发生成不同类型的故障信号, 继而用以测试继电保护系统在线路异常情况下的动作响应特性。故障设置子系统应尽可能多的反映出线路的各种异常情况 (包括: 区内外故障、发展性故障、非全相运行、系统振荡以及弱馈系统等), 以满足对继电保护测试完备性的要求。

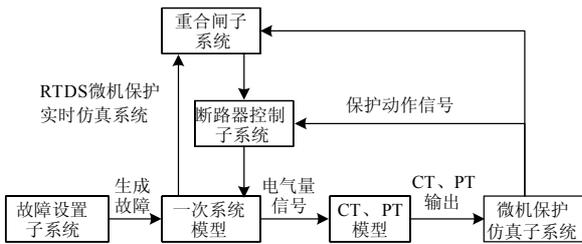


图3 微机保护实时仿真系统软件结构

Fig.3 Software architecture of the real time simulation system for digital protections

2.2 保护组件

RTDS不但提供了精确而丰富的电力一次系统模型, 而且还拥有出色的二次开发能力。本文利用RTDS中提供的CBuilder^[11]开发工具, 开发了大量高压线路保护组件, 源代码逾一万行。

利用模块化和可视化的开发思想, 本文将微机保护按照其功能的不同划分为采样滤波单元、基本算法单元、保护功能单元以及逻辑单元等, 组件库结构如图4。其中, 保护功能单元中对组件的划分方法依照IEC 61850标准。例如, 方向元件为RDIR, 距离元件为PDIS等等。基于这些组件, 即可利用RTDS中的draft^[11]模块构建各种微机保护系统。

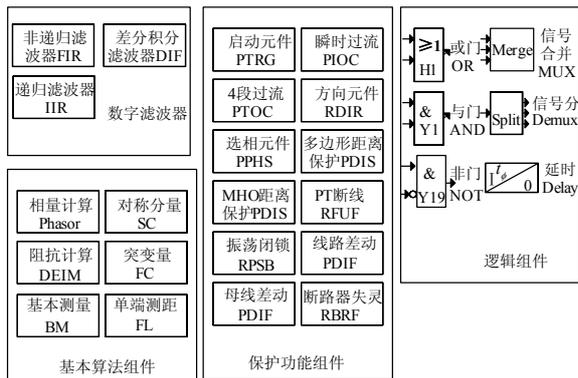


图4 保护实时仿真系统组件库

Fig.4 Component library of real time protection simulation system

2.3 保护系统

上述保护组件等同于IEC 61131-3中定义的功能块 (Function Block, FB)。这样, 可以可视化方式在RTDS中搭建完整的高压线路保护仿真模型。

篇幅所限, 在图5中仅给出了距离 I 段的保护逻辑。另外, 图5中距离元件的输出 (如总跳、跳A等) 尚需经过跳闸逻辑才能最终出口。

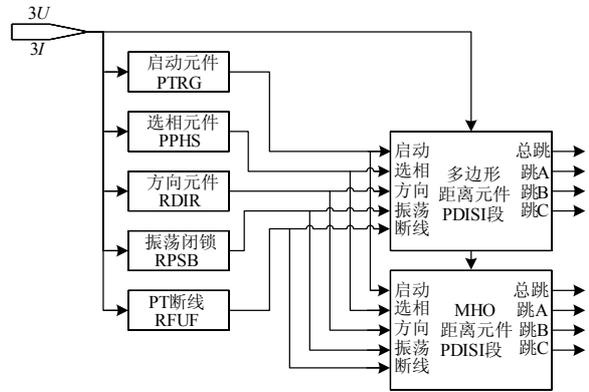


图5 距离保护可视化逻辑 (I 段)

Fig.5 Visual logic of distance relay (zone I)

3 仿真结果

根据《DL/T871-2004电力系统继电保护产品动模试验》标准, 在RTDS中建立了220 kV高压输电线路试验模型和系统参数。利用上述保护组件搭建了两套高压线路保护 (含高频距离和方向), 并将该“软保护”部署于线路两侧。利用RTDS系统提供的脚本功能, 自动产生了大量典型故障对保护仿真系统进行了详细测试, 动作行为皆正确。

图6为某次测试的系统模型, 测试中启用了RTDS系统的四片PowerPC处理器进行并行计算。利用多线程等一系列技术, 一、二次系统皆可在仿真步长为50 μs的设置下实时运行。

在RTDS的运行 (Runtime) 界面下可实时监控被测系统各组件的运行状况, 实现了可视化测试与分析的目的, 界面如图7所示。图7中左上角为故障控制区, 其中: FaultControl用来控制故障类型; FaultLoc控制故障位置 (包括背侧故障和远端区外故障); FLT按钮用于触发故障。另外, 用户还可以通过滑竿调节故障点的位置、故障持续时间、切入角和过渡电阻大小等。图7中右上方显示保护特性曲线, 依次对应三个接地距离测量元件和三个相间距离测量元件。保护测量阻抗的变化轨迹可以叠加显示在保护特性图中。除此之外, 系统还可显示多种辅助分析波形, 如CT、PT输出波形, 启动元件、方向元件、选相元件以及跳闸、重合闸等重要元件的动作信号。

图7清晰显示了发生A相接地故障时的保护动作情况。故障位置在线路总长的50%处, 故障注入角为45°。故障发生后, 阻抗轨迹由故障前的负荷

区域进入保护动作区域，最后稳定于约线路的50%处。此时保护发跳闸信号，由断路器控制子系统实时跳开断路器、切除故障。经过设定延时后，重合处闸子系统发出重合信号。由于是瞬时性故障，A相测量阻抗轨迹又运动到特性曲线外部。最终合闸

成功，系统恢复到正常运行状态。

上述测试采用图2 (b) 所示的完全数字仿真方式。通过在线路一侧接入ABB REL670线路保护装置，本文也对图2 (a) 所示的物理、数字混合仿真方式进行了初步测试，验证了其可行性。

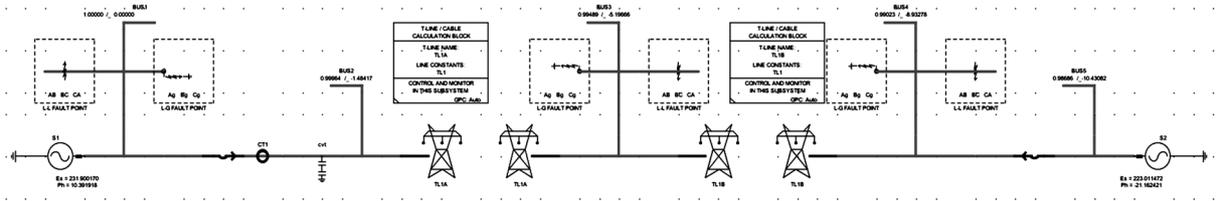


图 6 一次系统模型

Fig.6 Primary system model

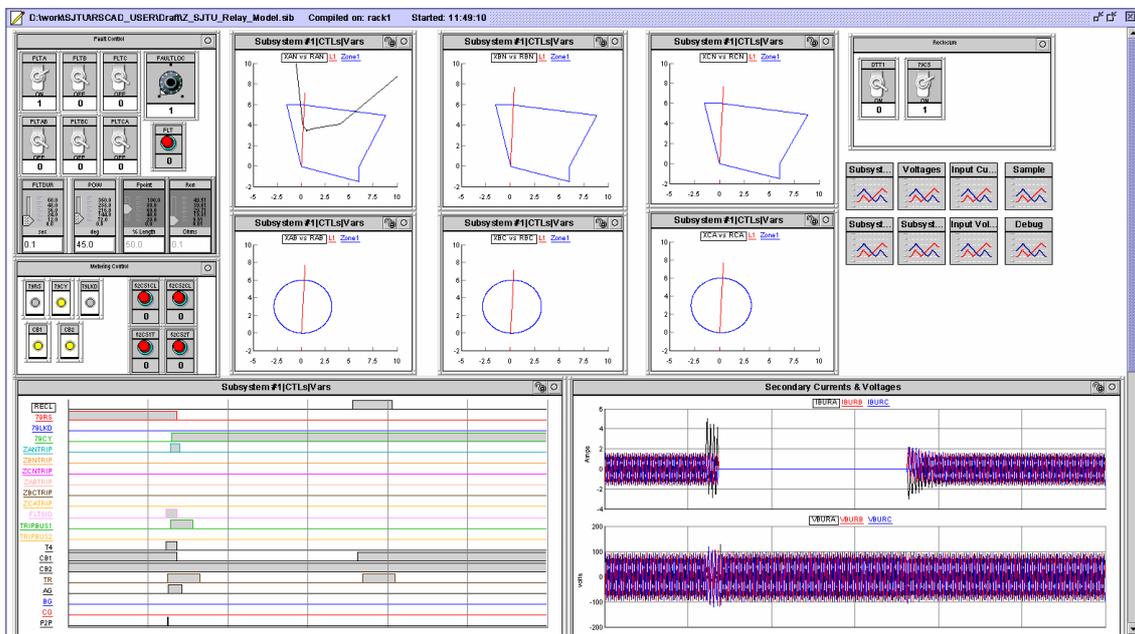


图 7 保护实时仿真系统主界面

Fig.7 GUI of the real time protection simulation system

4 结论

本文按照IEC 61850中逻辑节点的划分方法，基于RTDS开发了大量微机保护仿真组件，将实时仿真从一次系统扩广到二次系统，以可视化方式构成微机保护实时闭环仿真系统。有如下结论：

(1) RTDS不但能仿真一次系统，而且能仿真微机保护等复杂的二次系统。利用RTDS的并行处理技术，对复杂保护系统仿真也可达到实时要求。

(2) 基于RTDS的微机保护实时仿真系统配置灵活、可重复性强。既可以与物理保护装置构成混合测试系统，也可以纯粹由保护仿真模型构成完全数字化仿真系统。

(3) 整个一、二次系统的运行过程都在可视化的条件下进行。由于实现了一、二次系统的闭环，仿真结果更接近于电力系统真实运行情况，可以大大提高微机保护测试、分析和研发的效率。

参考文献

[1] 程刚, 张沛超. 基于Matlab和ATP的微机距离保护动态仿真[J]. 继电器, 2006, 34 (22) : 5-8.
CHENG Gang, ZHANG Pei-chao. Dynamic simulation of microprocessor-based distance protection based on Matlab and ATP[J]. Relay, 2006, 34 (22) : 5-8.

[2] Nadil Berbic, Rizah Memisevic, Jozse Vorsic. Application of program packages EMTDC and Matlab in the analysis of impact of neutral point operating regime on the magnitude of touch voltage[J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2005, 20 (1): 838-843.
- [3] 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.
- [4] Mojtaba Khederzadeh. The impact of FACTS device on digital multifunctional protective relays[C]// Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE, 2002, 10 (3): 2043-2048.
- [5] 顾黄晶, 张沛超. 光学电流互感器对线路差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (5): 61-64.
GU Huang-jing, ZHANG Pei-chao. Influence of optical current transducer on line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (5): 61-64.
- [6] 董新洲, 丁磊. 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (1): 2-5.
DONG Xin-zhou, DING Lei. Research on design of digital integrated protection and control system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (1): 2-5.
- [7] 何世恩, 刘峻. IEC 61850数字化变电站对继电保护专业的的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (3): 2-4.
HE Shi-en, LIU Jun. Impacts of IEC 61850 digital substation on relaying protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (3): 2-4.
- [8] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1): 77-82.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1): 77-82.
- [9] Zhang Peichao, Portillo Levi, Kezunovic Mladen. Compatibility and interoperability evaluation for all-digital protection system through automatic application test[C]. //IEEE PES General Meeting. Montreal(Canada): 2006.
- [10] 顾黄晶, 张沛超. 全数字化保护系统的主要问题及解决方案[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (5): 61-64.
GU Huang-jing, ZHANG Pei-chao. Main issues of all-digital protection system and solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (5): 61-64.
- [11] RTDS Technologies Inc. Real time digital simulation for the power industry manual set, 2007.

收稿日期: 2009-09-18; 修回日期: 2009-11-01

作者简介:

周巍 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护仿真技术; E-mail: yigu@sjtu.edu.cn

张沛超 (1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护、专家系统在电力系统中的应用、电网调度自动化技术; E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn.

杨星星 (1984-), 男, 硕士, 主要从事电力系统运行工作。

(上接第 126 页 continued from page 126)

- [5] 张葆刚. 大连电力通信网监控系统设计方案[J]. 东北电力技术, 2005 (3): 41-44.
ZHANG Bao-gang. On the designing of the monitoring system of Dalian power communication network[J]. Northeast Electric Power Technology, 2005 (3): 41-44.
- [6] 余约华. 电力通信监控系统与管理系统的综合实现[J]. 电力系统通信, 2003 (4): 45-47.
YU Yue-hua. The implement of electric power communication surveillance & measure system and administration system[J]. Elecommunications for Electric Power System, 2003 (4): 45-47.
- [7] 李立达. 电力通信网综合管理系统故障告警机制的设计与实现[J]. 电力系统通信, 2006, 27 (170): 13-16.
LI Li-da. Design and realization of fault alarm mechanism in network management system of power telecommunications network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27 (170): 13-16.
- [8] 张振玉. 华中电力通信网监控系统设计介绍[J]. 华中电, 2006, 19 (2): 38-40.
LIU Zhen-yu. Introduction about the design of central China communication network monitor system[J]. Central China Electric Power, 2006, 19 (2): 38-40.

收稿日期: 2009-09-12; 修回日期: 2009-11-03

作者简介:

王东蕊 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统; E-mail: wangdongrui-0083@163.com

刘晓丽 (1973-), 女, 硕士学位, 高级工程师, 主要从事电力通信系统规划和电力通信系统告警综合管理方面的研究工作。