

[控制系统]

基于实时数字仿真系统的线路差动保护试验方法

文/中国电力科学研究院 姜玉磊 黄树帮 樊 陈
上海电力学院 范 宏 高绘彦 季昕雨

阐述了线路差动保护原理，在此基础上利用实时数字仿真系统模拟实际情况，对线路差动保护进行硬件装置连接、仿真建模和仿真运行。仿真结果表明，所提方法仿真结果准确、可靠，为保护装置测试提出了先进的仿真测试平台。

电力系统继电保护的基本性能要求为可靠性、选择性、速动性和灵敏性。随着电力系统的发展，继电保护装置越来越成为电力系统安全稳定运行的重要保障，同时对继电保护装置提出了更高的要求，使得被保护线路每一点的故障都能够瞬时切除。而差动保护能满足这一要求。线路差动保护从原理上来看是一种理想的保护方式，具有输电线路内部短路时动作的绝对选择性。

差动保护也被称为“平衡保护”，是指保护设备根据判断被保护设备各引出线上的电气量之间是否达到平衡从而判断被保护设备内部是否发生故障，决定是否切除被保护线路。差动保护根据所应用的场合和获取的电气量是否来自同一电气量分为纵联差动保护和横联差动保护，而线路纵联差动保护是应用最广泛的差动保护。与其他需要电压的线路保护判据相比，差动保护具有简单可靠、动作速度快的优点。

实时数字仿真系统RTDS是基于多CPU并行处理技术，以EMTDC为软件核心、PSCAD为图形界面

的全数字实时仿真装置，具有构建模型方便、系统模型多、同类故障工况可重复再现等诸多方面的优点，其元件模型和仿真精度获得了仿真领域的高度认可，主要用于电力系统的电磁暂态仿真以及控制保护装置的检验测试。RTDS在继电保护装置的校验试验上，为研究保护装置的性能提供了有利的手段。RTDS元件库的模型经过严

格的测试，保证了试验结果的准确性和可靠性，降低了保护装置误动作的可能性。

本文提出了一种基于实时仿真系统RTDS的线路差动保护试验建模仿真的方法，对继电保护装置进行闭环检测试验，为继电保护装置测试提供先进的仿真测试平台。

线路差动保护原理

线路差动保护在发电机、变压器、母线、电抗器、大容量电动机和输配电线路等电气设备中都得到了应用。其基本原理是基于基尔霍夫电流定律，利用差动电流的大小对故障进行判断，其原理简单、保护范围明确且动作不需延时。正常运行或外部故障时，流经线路两侧的电流相等，若不计电流互感器的误差，流入继电器的电流为零，继电器不动作。而当保护范围内部发生故障时，即两电流互感器之间的线路上发生故障时，两侧电源分别向短路点供给短路电流如图1所示。

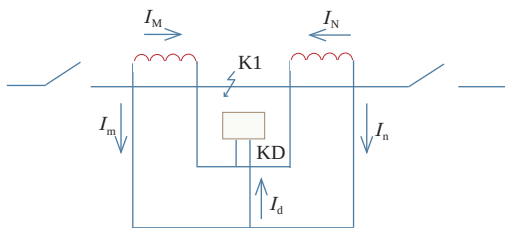


图1 线路差动保护原理图

当电流大于继电器动作电流时，继电器动作，瞬时跳开线路两侧的断路器。根据比较的结果能够可靠地区分是区内故障还是区外故障。由于线路差动保护是测量线路两侧的电流并进行比较，因此它的保护范围是两侧电流互感器之间线路的全长，并且在整定值上不需与相邻线路保护配合。

RTDS平台下的试验模型

1. RTDS仿真系统简介

实时数字仿真系统（Real Time Digital Simulator, RTDS）是加拿大Manitoba高压直流研究中心开发的，基于电磁暂态程序的、专门用于实时研究电力系统的全数字实时仿真装置，有效地将计算机技术、并行处理技术和数字仿真技术发展结合在一起。RTDS可以在 $50\mu\text{s}$ 级的步长上运行，也可满足 $2\mu\text{s}$ 级小仿真步长的需要，具有建模周期短、灵活性强、频率特性范围大和仿真结果稳定精确等特点。其丰富的元件库模型可以满足用户搭建电力系统一次模型和二次模型的需要。它的实时性和带被测试设备闭环运行的能力是其他仿真软件无可比拟的，是目前世界上技术最成熟、应用最广泛的实时数字仿真系统。本文所提出的差动保护试验方法信息的传输量大，并且要求两侧信息同步采集，RTDS能够很好地满足这一技术要求。

2. 测试系统硬件建设

RTDS的硬件由机柜和Rack组成。Rack中装有各种负责通信、运算的功能模块，各个模块之间并行计算，提高数据处理和计算速度，从而达到实时仿真的目的。本文所提出的线路差动保护试验方法中采用2个Rack。硬件接线方式如图2所示。RTDS由模拟量输出板卡GTAO卡输出两组三相电流、三相电压，接至功率放大器，电压放大20倍，电流放大8倍，经过录波仪传送至线路保护设备；RTDS由数字量输出板卡GTDO卡输出6个断路器位置信号，分别是G侧A相断路器位置、G侧B相断路器位置、G侧C相断路器位置、S侧A相断路器位置、S侧B相断路器位置、S侧C相断路器位置；线路保护设备根据电压、电流、断路器位置等信息判断故障类型与地点，发出相应的跳闸信号，RTDS由数字量输入板卡GTDI卡接收6个断路器分闸信号，分别为G侧A相分闸信号、G侧B相分闸信号、G侧C相分闸信号、S侧A相分闸信号、S侧B相分闸信号和S侧C相分闸信号。各个硬件之间相互配合，使得保护装置与RTDS构成闭环回路。

号、S侧B相分闸信号和S侧C相分闸信号。各个硬件之间相互配合，使得保护装置与RTDS构成闭环回路。

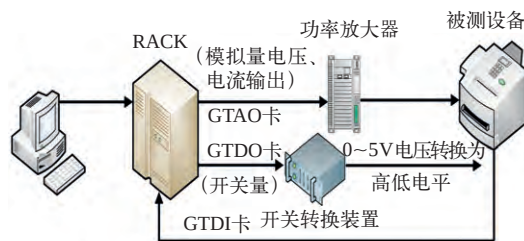


图2 硬件接线图

3. 线路差动保护仿真建模

根据电力行业标准DL/T 871—2004 电力系统继电保护产品动模试验的要求，利用RTDS元件库提供的模型元件，结合实际电力系统各元件参数建立含有两个电源的试验系统模型，图3所示为线路差动保护试验测试系统的接线示意图。G侧无穷大系统与S侧无穷大系统通过一段线路相连，电压等级为500 kV。无穷大系统经过G侧单相断路器，经过一段线路后，经过S侧单相断路器，接至S侧500 kV电源侧。试验共设置了5个故障点，其中，F1、F2和F3为区内故障，F1为G侧断路器出口处，F2为线路中点，F3为S侧断路器出口处；F4、F5为区外故障。

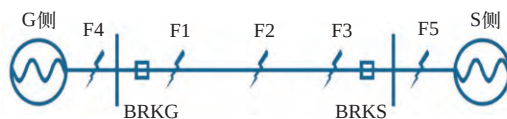


图3 测试系统接线图

4. 线路差动保护仿真运行

根据系统平台模型的一次系统模型图，在RSCAD的仿真运行（Runtime）模块中搭建该闭环测试平台的操作系统模型，Runtime模块的主要功能是使用户能对正在仿真的系统进行监视和操作。图4所示为故障触发操作模型，其中FLTLOC1、FLTLOC2为故障位置选择，共5个故障位置；fltype1、fltype2为故障类型选择，共10种故障类型；MULTIFLT为多重故障选择开关，当MULTIFLT开关置1时，表示发生区内和区外转换性故障。在仿真运行操作界面中，控制对应的开关以及系统启动按钮即可开始启动故障模拟系统和相应的操作。

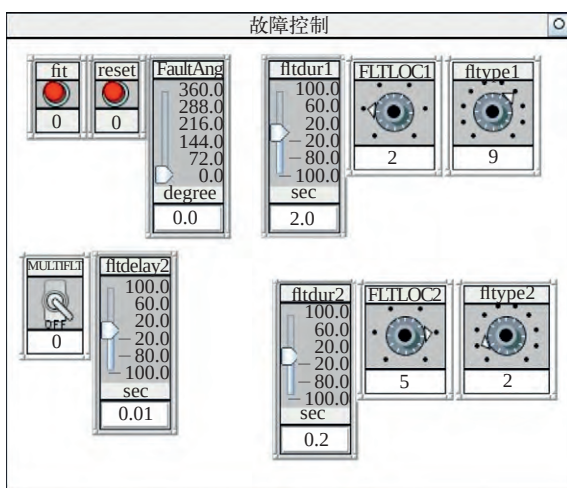


图4 故障触发操作模型

差动保护试验项目

1. 保护区内外金属性故障

该试验项目模拟保护区内F1、F2、F3处和区外F4、F5处发生瞬时性和永久性的金属性故障时，保护装置的动作情况。金属性故障类型有单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。对于瞬时性故障，故障持续时间设置为0.2 s；对于永久性故障，故障持续时间设置为2.0 s。对于区内故障，保护装置应在发生故障后的30 ms内动作，发出跳闸信号，断开断路器；对于区外故障，保护装置应当不动作。

2. 转换性故障

该试验项目模拟区内和区外发生转换性故障（如区内F3转换为区外F5），故障类型包括单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。保护装置应当在区内故障发生后动作，区外故障发生后不动作。

3. 经过渡电阻故障

该试验项目模拟区内外故障点经过渡电阻发生单相接地短路、两相相间短路。非故障相的过渡电阻取值为0.001 Ω ，故障相的过渡电阻取值为100 Ω 。对继电保护装置的要求为当保护装置按照正常逻辑动作，不出现拒动或误动情况。

4. 系统振荡

该试验项目模拟在系统不同频率下，区内和区外发生故障对保护装置的影响。试验过程中，通过修改一侧电源频率，使系统两端发生振荡，从而得到期望的振荡频率下的工况。当系统发生振荡时，对差动保护的要求是无故障发生时保护不动作，区内故障时保护不拒动，区外故障时保护不误动。故障类型有单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。

5. 弱馈试验

在线路两端只有一端供电，去掉另一端电源的情况下，模拟区内和区外发生瞬时性故障时保护装置的动作情况。故障类型有单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。对保护装置的要求为保护装置按照正常逻辑动作，区内保护不拒动，区外保护不误动。

6. PT断线试验

模拟线路一侧电压互感器单相断线后区内外发生金属性单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。要求保护装置正确动作。

7. CT断线试验

模拟线路一侧电压互感器单相断线后区内外发生金属性单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。要求保护装置正确动作。

8. CT饱和试验

模拟区内外发生故障时线路一侧的电流互感器出现暂态饱和的情况。由于CT饱和引起的电流波形畸变会产生较大的电流差，使保护装置误动作，在两侧CT饱和程度不一致的情况下最为严重，这就要求保护装置在区外故障出现暂态饱和时不误动，在区内故障发生暂态饱和时能够可靠动作。试验过程中通过调节电流互感器的电阻，使饱和时间小于5 ms。

9. 手合故障

将线路两端的开关全部断开，先闭合其中一个开关，在无故障情况下保护装置不应动作；先闭合其中一个开关，再闭合另一个开关，模拟无故障和金属性故障情况下保护装置的动作情况。保护装置应按照正常逻辑动作。

10. 频率偏移试验

同时改变系统两端电源频率，使其均在48 Hz或52 Hz下运行，模拟保护区内外金属性单相接地、两相短路接地、两相相间短路和三相短路故障。要求保护装置正确动作。

11. 暂态超越试验

该试验项目模拟测量量超过保护装置整定值时，保护装置的动作情况。改变区内F2故障位置，将距离I段保护整定值设置为70%处。模拟各种金属性故障，若故障发生在65%之前，则I段保护应动作，II段保护不应动作；若故障发生在75%之后，则II段保护应动作，I段保护不应动作。

仿真测试

利用RTDS系统对线路保护装置进行试验，由

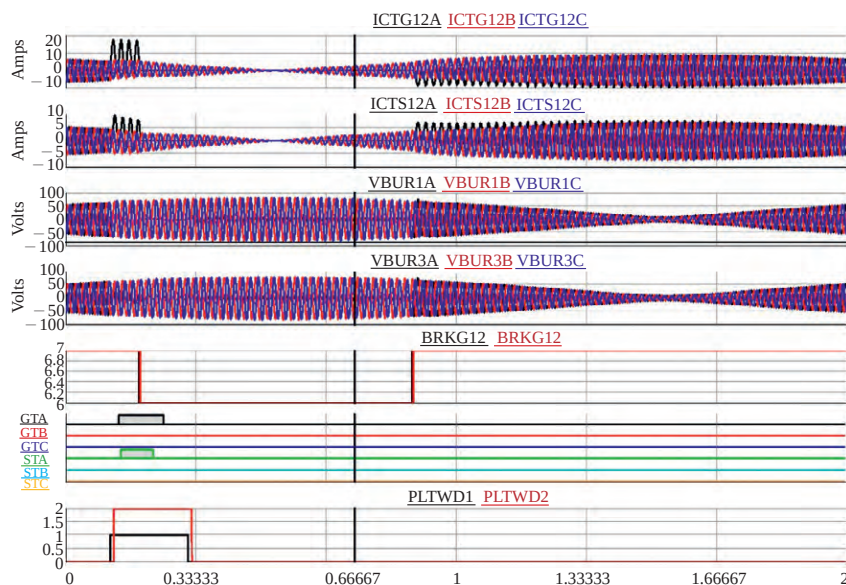


图5 系统振荡时区内F1处发生永久性A相接地故障

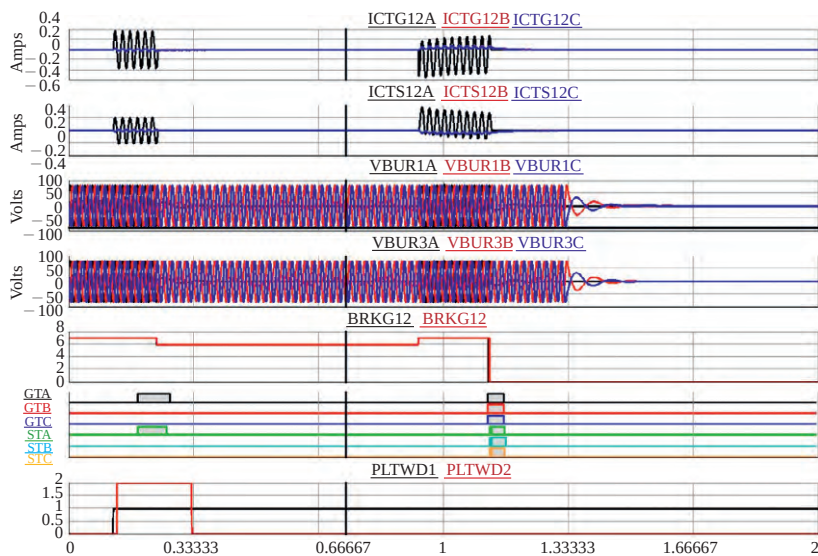


图6 区内F1处经过渡电阻发生A相单相接地故障

于试验项目较多，故障类型也较多，本文对系统振荡时母线区内外故障和经过渡电阻故障时进行分析。

图5为系统振荡时区内故障F1处发生永久性A相接地故障。其中，系统发生频率为2 Hz的振荡，G侧电源频率为49.5 Hz，S侧电源频率为50 Hz。由试验结果分析得出，当系统振荡时区内故障F1处发生永久性单相接地故障时，保护装置可靠动作，进一步分析可以得出G侧跳A相的动作时间为57.12 ms，S侧跳A相的动作时间为57.60 ms。经过一段时间重合闸，保护装置三相跳开。G侧保护装置三相的动作时间为37.92 ms，S侧保护装置三相的动作时间为34.08 ms。满足系统运行的要求。

结束语

实时数字仿真系统的实时性和闭环测试能力使得试验结果更加准确、可靠，能有效地检验继电保护装置的基本特性。但随着近年来新入网设备的逐渐增多，实验室配网自动化及继电保护等二次设备的检测任务骤然增加，而对二次设备性能可靠性的要求也大大提高。以线路保护装置为例，故障类型、故障区域繁多，而且多为重复性试验，这就无疑增加了检测人员的工作量。因此，开发出一套配网自动化测试平台，实现入网测试海量任务的自动测试，获取自动测试结果，提高实时数字仿真系统的利用效率和试验的精确度将成为一个新的研究课题。EA

(收稿日期：2015.01.30)

(编辑：杨得润)