

基于 RTDS 的超高压线路保护装置的试验研究

毛鹏¹, 杨立¹, 杜肖功¹, 李小滨¹, 索南加乐²

(1. 东方电子保护所, 山东 烟台 264001; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: RTDS(Real Time Digital System)能够比较真实地反映实际电力系统的故障性征,且具有一些模拟动模试验系统不能实现的性能,使其在高压线路保护装置的研制及开发过程中发挥着重要的作用。介绍高压线路保护装置动模测试的模型及要求的的同时,着重分析了当前高压线路保护装置研究的几个难点,并就此给出了在研制新一代高压线路保护产品 DF3621 中的处理策略和方法。大量的 RTDS 试验表明,DF3621 对于特殊工况、转换性故障等方面表现良好,能够满足高压线路对保护的要求。

关键词: 实时数字系统; 高压线路保护; 振荡闭锁

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)03-0055-05

0 引言

电力系统数字仿真具有不受原型系统规模和结构复杂性的限制,能够保证被研究、试验系统的安全性和具有良好的经济性、方便性等许多优点,正被越来越多的电力科技工作者所关注,并且在电力系统规划和设计、装置的研究开发、运行人员培训等领域发挥着重要的作用^[1]。众所周知,电力系统保护装置,尤其是高压/超高压电网的保护装置,需要足够的可靠性,并能适应于电力系统的各种工况,在任何故障类型下具有充分的灵敏度,能快速、准确地切除故障,以确保电网稳定、设备安全。但对于要求如此苛刻的装置,在现场中仅在很短的时间动作外,长期处于不动作状态,所以可供参考的实际故障经验非常少,至于投入实际电网试验的机会则更少。从而导致了研制高压电网保护装置产品一直是一个高技术含量、高门槛的行业,其开发研究中,电力系统实际经验和动模试验具有重要的地位。相比于传统的动模试验,全数字 RTDS 动模系统,具有模型构建方便、系统模型多、同类故障工况可重复再现等诸多方面的优点,给保护装置的开发研究提供了极其有利的手段,也从而确保了由此开发出的装置性能更加可靠。

本文在介绍东方电子公司 RTDS 动模系统测试新开发的超高压线路保护装置 DF3621 的基础上,详细地阐述了 RTDS 试验中几个特殊工况的测试情况,指出了当前超高压微机线路保护的几个研究难点,并给出了我们的处理方案和试验结果,以供同行参考。对特殊问题的研究尚需进行,开发研制的装置也需进一步进行现场试运行的考核。

1 RTDS 动模试验系统

1.1 RTDS 试验模型^[2]

RTDS 是由加拿大 Manitoba 直流研究中心(HVDC)开发的专门用于实时研究电力系统的数字动模系统,该系统中的电力系统元件模型和仿真算法是建立在已获得行业认可,且已广泛应用的 EMTP 和 EMDC 基础上的,其仿真结果与现场实际系统的真实情况是一致的。该系统已在全球多个国家和地区推广使用,我国目前也有多个单位引进了规模不等的 RTDS 系统。

RTDS 的基本组成部分为组(RACK),多个 RACK 之间通过总线相联,RACK 的数量决定了可仿真系统的规模。将 RTDS 实时模拟电量和开关量输入被测试保护装置,再将装置的输出信号引入仿真系统的开关量板,即可实现保护装置的闭环实时仿真试验。

使用 RTDS 进行继电保护产品试验的关键在于试验模型系统的建立。参照电力科学院的试验模型系统,结合本装置的开发定位:应用于 220 kV 及以上电压等级的单回线路,构建了以下几种线路模型。为更加接近现场实际,使测试结果具有说服力,所有线路模型均采用分布参数模型,电压等级为 500 kV。

(1) 单电源空载长线模型(I)

无穷大电源带 400 km 单回架空线路,无穷大电源短路容量为 3000 MVA。主要用于测试距离保护的暂态超越性能。

(2) 双电源双回线长线模型(II)

仿真系统模型如图 1 所示。被测保护装置 P₁ 和 P₂ 分别安装在 NL1 线路的 N 侧和 L 侧,保护所需

的线路电压信号由 500 kV/0.1 kV 的电容式电压互感器提供,保护所需的线路电流信号由 1250 A/1 A 的电流互感器提供。N 系统为一地区等值系统,短路容量分别为 3000 MVA。L 厂装有等值容量为 2100 MW 的发电机 M1 一台,变压器 B1 容量为 2500 MVA,所带负荷最大容量为 1000 MW,其中电动机负荷占 65%,电阻负荷占 35%。每条输电线路的两端都装有容量为 150 Mvar 的并联电抗器。正常情况下潮流 $P = 1000 \text{ MW}$, $Q = 480 \text{ Mvar}$ 。输电线路主要参数: $z_1 = z_2 = 0.0193 + j0.2793 / \text{km}$, $z_0 = 0.1788 + j0.8412 / \text{km}$, $c_1 = 0.013 \mu\text{F}/\text{km}$, $c_0 = 0.0092 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

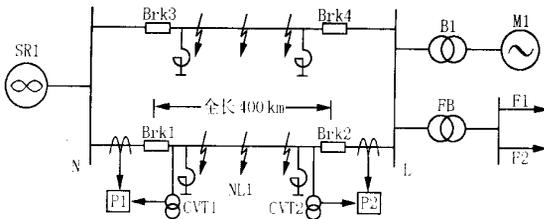


图 1 双回长线路模型

Fig. 1 Model of double-circuit long line

(3) 短线环网模型(III)

短线环网系统模型如图 2 所示。线路主要参数与模型 II 中的线路参数相同。被测试保护装置分别安装在 NL 线路的 L 侧和 N 侧。M 厂、N 厂及 L 系统经 500 kV 短距离输电线路相互连接。M 厂装有等值容量为 1050 MW 的发电机 M1 一台, N 厂装有等值容量为 1050 MW 的发电机 M2 一台。N 厂还接有负荷变压器 FB, 负荷变压器的容量为 1200 MVA, 所带负荷最大容量为 1000 MW, 其中电动机负荷占 65% 左右, 电阻性负荷占 35% 左右。L 系统为一地区等值系统, 有大、小两种运行方式, 其对应的短路容量为 3000 MVA 及 20000 MVA。

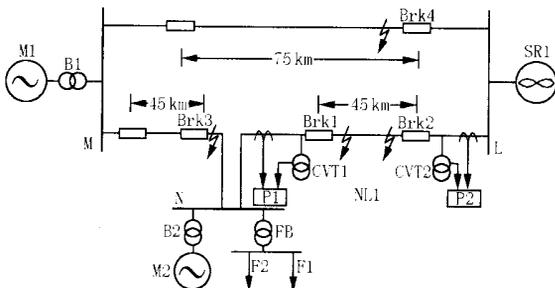


图 2 500 kV 短线环网输电模拟系统

Fig. 2 Model of 500 kV short-line ringed network

超高压电网线路本身特点所决定的某些元件模型的构建应特别注意, 尽量作到设计与实际相符, 其

真实性将直接影响保护装置的性能指标。其中电容式电压互感器 (CVT) 的采用, 导致了故障后获取的二次信号具有明显的暂态特性, 其对于距离保护在暂态超越试验以及出口故障试验中有重要的考验; 另外由于超高压电网的衰减时间常数较大, 某些故障情况下非周期分量衰减缓慢, 从而导致电流互感器 (CT) 出现饱和, 此点对保护装置也是一个非常重要的考核内容, 由此可知高压电网的特点对保护装置提出了更高的要求。对于不同的通道连接方式, 我们利用 SEL 保护装置的“可编程逻辑功能”来模拟, 得到了较好的试验效果。

1.2 测试内容及结果

为使研制开发的保护装置有一个较高的起点, 以优良的性能满足高压/超高压线路保护的各项要求, 以 SD286-88《线路继电保护产品动模试验技术条件》的内容为基本要求, 另外考虑到此标准制订于十几年前, 部分内容已不适应当前形式的需要, 所以结合目前系统的实际需要, 借鉴国内其他保护厂家的企标, 制定了我们的测试内容和性能要求。

我们开发的线路保护装置 DF3621 是定位于高压/超高压电力系统, 以纵联距离保护为主, 三段式距离保护、阶段式零序保护和反时限零序保护为后备保护, 并具有完善的辅助功能的成套保护装置。装置采用先进、可靠的软件平台, 硬件平台采用 32 位 CPU + DSP 模式, 为保护整体性能提供了可靠基础; 保护原理完备、先进, 在吸收目前国内同类保护产品优点的基础上, 增加了自适应、模式识别等一些成熟的研究成果, 从而使此装置在满足目前保护装置基本要求的前提下, 对特殊工况时的故障也具有令人满意的结果。

此次 RTDS 试验属于研制阶段的手段, 所以试验项目在完全包括电力科学院所有检测项目, 以及部分网局相关标准的前提下, 我们又增加了一些试验内容: 复故障、特高阻 (大于 300 Ω) 接地故障、振荡中经过渡电阻接地故障、CT 严重饱和和工况等。DF3621 的基本测试结果如表 1 所示。

其他项目如: PT 断线、CT 断线及饱和、手合空载线及故障线路等也作了充分的测试。经过上千次的试验表明: DF3621 高压线路保护装置各项指标均能满足要求, 性能稳定可靠, 对于特殊工况下的故障反应也得到了比较满意的结果。

2 高压线路保护装置的几个难点^[3~6]

我国的微机保护产品从投入现场实际运行到现

在已有十几年的历史了,在完成其之前集成保护所有功能的基础上,就保护功能而言真正性能提高的幅度不大,也可以说就保护原理而言未能充分发挥微机的优势。尤其是目前随着软、硬技术的飞速发展,一些研究成熟的高级算法、智能化分析方法等完全可以引入保护中。当然保护装置的开发以可靠为首,我们也正是本着这一原则,就目前保护装置解决不太理想的地方进行了试验性尝试。也希望同时引起同行对此类问题的关注。

表 1 RTDS 试验结果

Tab. 1 RTDS test results

试验项目	测试结果
距离保护暂态超越	3 %
动作时间	13 ~ 15 ms, 近端为 10 ms
(包括继电器	全线切除: 24 ~ 30 ms
动作时间)	零序保护
	13 ~ 18 ms
区内外转换性故障	区内故障正确切除, 近端正确选跳
经过渡电阻的区内、外故障	区外不误动, 区内正确切除
发展性故障	正确选跳
系统振荡及振荡中故障	振荡中故障正确选跳, 振荡不误动
非全相振荡及故障	二次故障快速切除, 纯振荡不误动
频率偏移后故障	频率偏移后性能指标基本不变
功率倒向及故障	倒向期间故障切除 43 ~ 47 ms

2.1 状态识别及自适应

严格地讲状态识别及自适应涉及很多方面,限于篇幅及本文的侧重点,就几个主要方面提出予以探讨。目前国内的保护装置,启动元件动作后,后续的故障处理过程是按照启动时刻为基准展开的,如突变量启动后相继执行快速段、稳态阶段、振荡闭锁阶段、跳闸后阶段以及非全相阶段,其他的内容如 PDX、加速则包含于其中。应该说此种方案是不合理的,我们所制定的保护处理方案是针对于保护装置之外的一次、二次的状态而言的,除了简单的单一性故障,程序处理和系统状态相符合外,大多数会导致不一致从而影响保护的整体性能。列举几例如下:

(1) 启动元件为保证各种可能故障下都能动作,整定的灵敏度非常高,所以启动元件动作往往并非故障的真实发生时刻;距离保护为兼顾近端故障快速切除和末端暂态超越不超标一般采用快速段保护以启动时刻为基准阶段放开保护范围的方法,此策略势必导致的结果是暂态超越试验动作时间不会太快,另外对于小扰动导致启动后一段时间发生的故障势必可能出现暂态超越超标。

(2) 目前微机距离保护一般采用短时开放,150 ms 后(以启动时刻为基准)进入振荡闭锁处理模块,通

过增加条件来开放保护。应当说此方案侧重于可靠性考虑,对于我国的电网稳定等方面具有积极的实用意义。但仅通过突变量启动元件动作后 150 ms 来运行振荡闭锁程序,应当说此元件过于灵敏,从而导致系统稳定情况下,小扰动导致启动后,再发生故障导致保护延时动作。

(3) 系统非全相运行期间,由于存在零序电流等特点,保护装置自动投入相应保护的同时,应退出某些会误动的保护元件,因此非全相状态一旦漏判,势必会影响保护装置的整体性能。而目前有些保护装置仅从本保护端三相断路器是否闭合来断定系统是否处于非全相状态的做法是不准确的,会导致单跳后优先重合侧保护装置误认为系统已恢复三相运行。

对于上述问题的出现,其根本性原因在于保护装置未能充分利用其强大的记忆及分析功能来准确识别系统状态,通过状态识别结果来投入相应的处理模块,此过程本身就体现了自适应思想。

新开发的线路保护装置 DF3621 改变了以前基于启动时刻调节保护范围的做法,而采用元件所用电流、电压量的波形(提出了波形系数的概念)来作为自适应选用数字滤波器、调节保护范围、调节方向元件动作范围等各个环节的基准。理论上分析可知:故障时刻的不同,故障暂态分量中非周期分量和各高次谐波分量是不同的。采用自适应调节滤波器后,可以避免统一采用差分傅氏算法在某些情况下放大谐波的可能。CT 饱和后,自适应采用短数据窗保证计算量的真实性。这样直接定位为体现元件输入量可信度的处理方式,从根本上保证了不论是何种原因导致的信号畸变都不会影响保护性能,同时也确保了任何故障情况下,保护在暂态超越指标范围内快速切除故障的可能。

系统振荡状态的出现是有先兆和需要过程的,这为我们提供了振荡状态识别的可能,充分利用微机保护的强记忆功能,采用状态预测算法,保证系统发生振荡之前,及时投入振荡闭锁处理模块,取消突变量启动 150 ms 后自认为系统已振荡的做法,确保小扰动启动后系统未振荡情况下再故障时保护装置的动作性能,这样从整体上提高了保护装置的性能指标。而对于非全相状态的识别,在监视跳开相电量和开关量的同时,应综合利用本保护各元件曾经感受行为,以及系统零序电量的变化行为,来作出定位于一次系统的非全相状态识别。

2.2 振荡中选相处理^[7]

振荡闭锁模块的处理方案,从确保电网稳定等方面出发,基本要求是振荡情况下保护不误动,其次是振荡中又发生故障,保护能够正确动作。目前保护装置基本上都能满足第一个性能指标,而第二个指标一般是通过保护延时动作,和降低性能指标等方式来实现的,即对于振荡中故障能否正确选相、正确计算阻抗量、耐过渡电阻各方面不作太严格的要求。而作为保护科技工作人员当然希望此工况下,保护性能指标不受影响,此点也是进一步研究的重点。

目前振荡中选相元件仅在故障开放条件满足后通过序分量以及计算阻抗来实现,势必导致某些故障情况下,仅当两端电势夹角摆到一定范围内才能开放,从而使保护延时动作;甚至不能开放,导致保护拒动或无选择性出口。新开发的线路保护装置 DF3621 中,专门针对系统振荡状态研制了一个基于模型识别方法的新型选相元件,其基本原理为综合利用保护安装处的各序量关系,以及推算得到的故障点处的各序量关系,最终给出正确的故障类型。由于此选相元件所需的开放条件比较灵敏,确保各种工况下都能选相,且振荡周期中不工作的盲区大大减少,提高了保护的选跳正确率并缩短了保护的動作时间。大量的 RTDS 动模试验已证明了此点。

2.3 转换性故障

对于同一点不同故障类型转换的发展性故障,采用选相元件、阻抗元件并行实时运算,故障类型变化后最先满足入段的元件优先固定的原则,可以满足测试指标;对于二次故障,即两次故障转换间隔相对较长,第一次故障已成功切除,此时按照状态检测调度再发生故障将由非全相故障处理模块来切除,各项性能指标一般保护装置都能满足。难点在于正、反向复故障情况,即正向出口、反向出口故障点同时存在,如果为不同相,对于单通道高频保护,远端保护装置只能无选择三跳,而近端保护装置则希望能够正确选跳,就此特殊故障类型,如果不作专门性处理,仅当在保护安装处所感受的区内故障附加电源产生的故障电量远大于区外故障附加电源所产生的电量时,才能保证选相正确,从而不能确保各种电网结构下保护性能的一致性。对此我们增加一灵敏度足够高的复故障检测元件,通过此元件来投入此工况下的专门选相元件,其综合利用电流序分量选相结果和电压序分量选相结果,以及保护测量元件的历史和当前感受情况,统一分析后最终给出正确的选相结果。

2.4 高阻接地故障

接地保护的耐过渡电阻能力是距离保护元件的重要测试项目,而距离保护元件是越量型元件,有别于测量元件,在保护范围之内,即使测量误差很大,也能使保护元件正确动作,由此可知耐过渡电阻的能力对于保护范围的不同点,具有不同的性能。所有基于金属性故障推出的距离元件在保护范围末端必将耐过渡电阻能力较弱。对此,我们采用了基于零序电流修正的测距算法来作为保护范围末端高阻单相接地故障时的测量元件,从而保证了不论保护范围内的何处故障都具有较高的耐过渡电阻能力,提高了装置的整体性能。

3 结论

大量的 RTDS 试验表明新开发的 DF3621 型线路保护装置各项性能指标比较令人满意,当然还需要长期现场试运行的考验。

RTDS 数字动模试验系统在保护装置开发中具有非常重要的作用,对原先基于经验开发装置、模拟动模试验测试、长期现场实际运行检验的装置研发模式有所改变,充分利用 RTDS 试验,作为保护装置开发的重要手段,将在缩短研发周期的同时,会不同程度地提高保护装置的整体性能。另外,我们在研发过程中感觉到:在完全理解目前保护装置产品处理方案的基础上,继承优点,就某些具有开发时代局限而不能很好地满足现在实际现场需求的处理方法,在充分测试的前提下可以采用新的研究成果以提高保护装置的综合性性能指标;随着技术的发展,用户需求的进一步提高,以及保护本身原理研究的突破,保护装置产品也应及时的升级换代,研制开发新产品。

参考文献:

- [1] 陈礼仪,顾强 (CHEN Li-yi, GU Qiang). 电力系统数字仿真及其发展 (Power System Digital Simulation and Its Development) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23 (23): 1-6.
- [2] 周泽昕,周春霞,王仕荣,等 (ZHOU Ze-xin, ZHOU Chun-xia, WANG Shi-rong, et al). 微机线路保护装置在动模试验中出现的一些问题 (Several Problems Appeared in Dynamic Simulation Tests for Microprocessor based Transmission Line Protective Relays) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25 (16): 39-44.
- [3] 李瑞生,冯秋芳,刘星,等 (LI Rui-sheng, FENG Qiufang, LIU Xing, et al). WXH - 801/802 数字式微机线路保护

- 的研究(The Research of WXH-801/802 Digital Microprocessor-based Line Protection System)[J]. 继电器(Relay), 2000,28(12):45-47.
- [4] 赵志华,吴全文,王路军,等(ZHAO Zhi-hua, WU Quannwen, WANG Lu-jun, et al). 高可靠性的新型数字式线路保护的研究(Research of New Digital Line Protection with High Reliability)[J]. 继电器(Relay), 2002,30(8):36-39.
- [5] 沈国荣,郑玉平,戴学安,等(SHEN Guo-rong, ZHENG Yurping, DAI Xue-an, et al). LFP-901A 和 LFP-902A 保护在特殊故障时的性能分析(Performances of LFP-901A and LFP-902A Digital Protection Relays in Some Special Faults)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999,23(14):24-28.
- [6] 朱声石(ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技术(Principle and Technology of High Tension Networks Protection)[J]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1995.
- [7] 索南加乐,许庆强,宋国兵,等(SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, SONG Guo-bing, et al). 电力系统振荡过程中序分量选相元件动作行为分析(Analysis on The Operating Characteristic of the Sequence-component Fault Phase Selection during Power Swings)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003,27(2):52-55.

收稿日期: 2003-05-12

作者简介:

毛鹏(1973-),男,博士,研究方向为电力系统故障分析、变电站综合自动化和电力系统继电保护;

杨立(1974-),男,工程师,主要从事变电站综合自动化和继电保护等方面的研究;

杜肖功(1971-),男,工程师,主要从事变电站综合自动化和继电保护等方面的研究。

Research on extra-high-voltage line protection based on RTDS

MAO Peng¹, YANG Li-fan¹, DU Xiao-gong¹, LI Xiao-bin¹, SUONAN Jia-le²

(1. Dongfang Electronic Group, Yantai 264001, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: RTDS(Real Time Digital System) can simulate fault characteristics of the real power system, which is superior to that of analog dynamic simulation system. Because of its characteristics, RTDS plays an important role in the research and development process of extrahigh-voltage(EHV) line protection. This paper introduces the test model and requirements of EHV line protection, and analyzes several difficulties of line protection devices in detail. Scheme and method for these problems in developing new high voltage line protection DF3621 are presented. Lots of RTDS test results show that DF3621 has high reliability and satisfactory performance to special operating conditions and translating faults.

Key words: RTDS; high-voltage line protection; swing block

(上接第 54 页 continued from page 54)

收稿日期: 2003-05-14; 修回日期: 2003-08-04

作者简介:

张志柳(1978-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统

运行与控制;

李晓明(1955-),男,教授,主要从事电力系统及其自动化的研究;

张莲梅(1971-),女,讲师,研究方向为电力系统运行与控制。

System integration and data exchange of heterogeneous configuration electric information system based on CORBA

ZHANG Zhi-liu, LI Xiao-ming, ZHANG Lian-mei

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: There are several heterogeneous configuration electric information systems in China at present. Each system is self-governed. However, the resources can't be shared, and information can't be exchanged in different systems. The paper introduces some general knowledge of CORBA, and puts forward a method based on CORBA, with which information integration and data exchange can be finished among several heterogeneous configuration electric information systems. Some functions have been developed based on heterogeneous configuration database.

Key words: CORBA; system integration; heterogeneous configuration database