

## 基于 Hypersim 的差动保护实时仿真测试研究

方明<sup>1</sup>, 付立军<sup>1</sup>, 叶志浩<sup>1</sup>, 曹爽<sup>2</sup>, 王良秀<sup>2</sup>, 孙海顺<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033; 2. 中船重工集团公司 704 研究所, 上海 200031; 3. 华中科技大学电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对目前电力系统保护装置难以进行系统级实验的情况, 采用实时仿真系统 Hypersim 构建了闭环测试平台。在 Hypersim 中建立了舰船环形供电网络的仿真系统, 将仿真电流输出至差动保护装置, 将装置的控制信号引入 Hypersim 实时仿真系统中进行闭环实验。对环形网络中典型短路故障进行了实验研究, 差动保护装置动作正确。该实时仿真系统可用于其他复杂网络的保护测试。

**关键词:** Hypersim 实时仿真系统; 差动保护装置; 环形电网; 闭环测试

### Real-time simulation testing system of differential protection device based on Hypersim

FANG Ming<sup>1</sup>, FU Li-jun<sup>1</sup>, YE Zhi-hao<sup>1</sup>, CAO Shuang<sup>2</sup>, WANG Liang-xiu<sup>2</sup>, SUN Hai-shun<sup>3</sup>

(1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. The No.704 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Shanghai 200031, China; 3. College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To solve the problem that it is difficult to conduct systematic grade test of protection device in the power system, a close-loop testing platform based on Hypersim real-time simulation system is established. A simulation system for shipboard power system of ring architecture is set up in Hypersim, which outputs the simulative current to the differential protection device and inputs the control signals from the protection device to Hypersim real time simulation system to conduct a close-loop testing environment. The test on typical short-circuit fault in ring net is carried out. The differential protection devices act correctly and the real-time testing system can be applied to other complex power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977090).

**Key words:** Hypersim real-time simulation system; differential protection device; ring power system; close-loop testing

中图分类号: TM77; TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0122-05

## 0 引言

现有电力系统保护装置大多只进行开环实验, 对于测试保护装置的动作特性和分断能力而言, 开环实验已经足够。但如果要研究保护装置在实际网络中的工作情况, 则必须构建实验系统或采用实时仿真的方式进行闭环实验。搭建物理实验平台意味着需要大量的人力和高昂的费用。由于短路故障属于电力系统极具破坏力的故障, 保护的设计中若有考虑不周全的地方, 在短路实验中将实验用的发电机产生很大的影响, 甚至可能导致发电机的烧毁; 而采用电力系统实时仿真系统构建实验平

台<sup>[1-5]</sup>, 耗时少, 费用低, 无危险, 并且可以方便快捷地改变网络结构和实验参数, 记录实验数据以供分析, 为保护方法及保护装置研制提供了一种有效、安全、经济、方便的手段。

本文采用电力系统实时仿真软件 Hypersim 构建了差动保护装置实时仿真闭环测试系统, 针对舰船电力系统环形供电网络, 对其典型短路故障情况下、差动保护的运行行为进行了测试, 检验差动保护装置动作的有效性与合理性。

## 1 Hypersim 仿真系统

电力系统实时仿真系统 Hypersim<sup>[6]</sup>集成硬件系统和软件系统两大部分, 该系统既可以利用 Unix 工作站进行单处理器或多处理器的离线仿真, 也可

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会创新群体科学基金 (50721063); 国家自然科学基金 (50977090)

以通过 SGI Origin 350 服务器进行实时仿真。

整套 Hypersim 仿真系统如图 1 所示, 主要包括四个部分: 从右至左的三个柜子分别为 Origin 350 的计算机服务器, 输入输出 PCI 卡, I/O 接口架, 另有基于 Linux 的计算机工作站。



图 1 Hypersim 实时仿真系统

Fig.1 Structure of Hypersim real-time simulation system

#### (1) Origin 350 的计算机服务器

Hypersim 采用基于共享存储器的多 CPU 并行处理计算机, 如 Origin 350。本系统采用 Origin 350, 包括 6 个基本运算模块, 每个运算模块包含 4 个 64 位 MIPS RISC 处理器, 8 G 的本地存储空间。

#### (2) 输入输出 PCI 卡

Hypersim 的接口系统为基于 PCI 卡的 IOSIM 系统, 主要由四部分构成。

##### 1) 模拟信号接口

包括 A/D 模数转换器 IOSIM-330 和 D/A 数模转换器 IOSIM-340。

##### 2) 模拟信号缓冲器

模拟信号缓冲器 IOSIM-320 用来缓冲来自 IOSIM-330 和 IOSIM-340 的 I/O 信号。

##### 3) 逻辑信号转换器

逻辑信号转换器包括三部分: IOSIM-480, IOSIM-470 和 IOSIM-490。三者串联使逻辑信号从 SGI 仿真系统与外部设备相联系。

##### 4) 通用联接面板

通用联接面板 IOSIM-720 是实时仿真系统与外部设备传递信号的主要器件, 主要实现输入输出信号的通道配置, 保护和指示功能。

#### (3) I/O 接口架

放置各种信号放大器或是显示测量仪器, 图 1

所示为两台 OMICRON 的 CMS156 三相电压/三相电流放大器。

#### (4) 基于 Linux 的计算机工作站

本实验系统采用的是基于 Linux 的 HP 工作站, 用户可通过工作站的 Hypersim 图形界面进行建模仿真。

电力系统实时仿真软件 Hypersim 与 RTDS 算法基本都采用基于 EMTP 的快速电磁暂态仿真算法, 但 RTDS 不仅开发仿真软件, 而且开发仿真软件运行的专用硬件平台。RTDS 采用的是高速数字信号处理器 (DSP) 芯片并行处理的硬件结构, 其硬件的基本组成单元是 rack, 每个 rack 包含一定数目的 DSP 芯片, 完成该 rack 所对应设备的仿真计算, 不同 rack 之间通过数据通信交换数据、协调动作。由于每个 rack 处理节点的能力有限, 而不同 rack 之间必须通过传输延迟来完成数据通信<sup>[7]</sup>。因此, 对于节点密集、设备之间距离很短的舰船电力系统, RTDS 难以达到仿真要求。HYPERSIM 的处理方法是加入所谓的解耦元件, 即基本按 CPU 的数目将整个系统运算任务分解为多个子任务, 不同子任务之间的数据交换有一个步长的延时, 该延时环节放在变化极小的直流电路上, 但该误差不会对系统的实时性和正确性产生影响。

## 2 舰船电力系统的差动保护

差动保护装置是迅速切除故障, 保证供电系统可靠供电的重要功能模块, 可在故障发生后进行紧急处理, 有效限制供电中断区域、减小故障影响范围和程度。尤其是对于网络结构复杂的舰船供电系统, 由于运行方式灵活多变, 设备和负载众多, 系统的各个电站、连接站位置分散, 连接电缆跨度也很长, 使用差动保护装置可实现发电机定子绕组及主电缆、电站内跨接线及电站间舷侧跨接线、负载引出线的三相和相间短路的完全选择性保护<sup>[8]</sup>。

其主要功能可分为三个部分。

#### (1) 故障定位功能

差动保护装置通过采集的差动电流信号, 判断短路故障是否在被保护区域内, 实现定位的完全选择性。

#### (2) 故障切除功能

迅速可靠地执行保护动作指令, 有效隔离故障区域, 使非故障区域能安全有效地继续运行。

#### (3) 故障报警功能

故障发生后, 在进行定位和切除的同时, 具有声光报警的功能。

现有舰船电力系统采用的是时间电流原则的保

护方法，当用于如图 2 所示的环形电网时，其主要的缺点在于保护的选择性不够，可能造成失电范围的扩大。例如当发电机 DG1 的出口发生短路故障 F4 时，由于跨接开关设置为瞬动，因此前后电站必定会解列运行，这样可能导致前电站发电机 DG2 过载，从而需要切除部分负载。

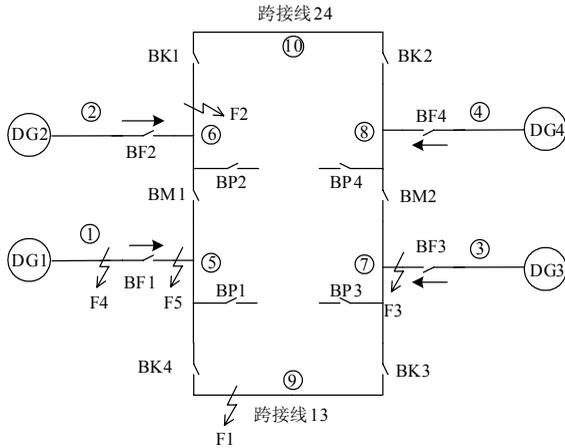


图 2 舰船环形网络

Fig.2 Ring structure of ship power system

差动保护可以较好地解决这一问题。对于图 2 所示的舰船电力系统环形输电网络，需要分成 10 个区域分别进行差动保护，如图 2 中标号①~⑩。每个区域的差动装置采集本区域边界的所有断路器上的电流信号，例如区域⑤的差动信号来自断路器 BF1, BM1, BP1 和 BK4。

舰船电力系统对可靠性和生命力的要求极高，差动保护由于需要采集多个端点的电流信号，对于信号通信的要求很高，因此存在着可靠性较差的缺点。与传统的时间电流原则的保护方法相比，差动保护没有后备保护，当差动保护失效或保护开关拒动时，会导致故障蔓延、设备损坏甚至全舰失电等恶劣后果，因此，必须考虑必要的后备保护方式，以增加系统保护的可靠性。可以考虑使用差动加短延时的复合保护形式，短延时时间的设定与电流时间原则保护的设定相同。

### 3 实验方案

在 Hypersim 实时仿真系统中构建了舰船电力系统环形网络的全系统仿真模型，如图 2 所示。整个电力系统由四个电站组成，每个电站由一台中压发电机、一台配电变压器、一台等效负载电动机和等效阻感负载组成。四个电站之间通过母联和跨接开关组成环形网络，正常情况下母联和跨接开关闭合，四个电站并网运行。

与现在流行的商业软件类似，Hypersim 中提供了各种常用电力系统元件模型<sup>[9]</sup>，包括发电机、变压器、输电线、电动机、电源、断路器、阻感负载等，以及与发电机控制相关的励磁调节器、调速器和电力系统稳定器（PSS）。Hypersim 还提供了逻辑运算和数学运算单元，以使用户方便地实现控制系统的建模。因此整个电力系统的建模过程就是利用元件库中的元件，将整个系统合理的连接起来，并将参数按实际情况设定。

构建实时仿真实验系统，需要在 Hypersim 中设置断路器的 sensor，将差动电流信号通过 D/A 接口输出。差动信号经信号放大器变换成供检测的电流引入差动保护装置，保护装置检测故障是否发生，得出开关动作信号 Ftoi9P，经 DI 接口输入 Hypersim 实时仿真系统使相应的开关动作，其示意图如图 3 所示。当差动装置保护跨接线 13 时，差动电流信号由跨接开关 QFM13 和 BrE9 的电流信号形成；当差动装置保护发电机 DG1 时，差动电流信号由发电机 DG1 定子电流和开关 QFA1 的电流信号形成。需要特别指出的是开关接收到跳闸信号后并不能立即断开，而要经过一段时间的延时。由于电流波形的波动，在这段时间延时期间，当电流下降到低于动作电流整定值时，差动保护判断机构将发出开关闭合信号，开关又会马上闭合，这将导致电流上升，差动保护判断机构将再次发出开关跳闸信号。这样差动保护判断机构将一直重复的发出开关跳闸与闭合信号，开关将不能正确的断开，故障也无法切除。因此必须在差动保护判断机构的信号输出端加入一个信号保持装置，使其发出的第一个开关跳闸信号一直保持不变。本实验中是在 Hypersim 内部加入了信号保持电路，如图 4 所示。

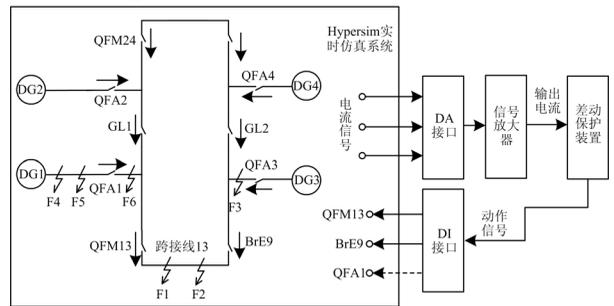


图 3 实验系统结构

Fig.3 Structure of experimental system

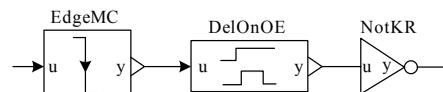


图 4 信号保持电路

Fig.4 Signal holding circuit

### 4 实验结果及分析

为了验证差动保护装置在环形电网中的工作情况,对跨接线和发电机出口侧短路故障进行了实验研究,短路时间设置在 0.205 s,具体内容如下。

(1) 跨接线 13 发生三相短路 F1。差动装置在 0.209 s 时发出开关动作信号 Ftoi9P,跨接开关 QFM13 和 BrE9 在 0.222 s 时彻底分断电流。

(2) 跨接线 13 发生两相短路 F2。差动装置在 0.213 s 时发出开关动作信号 Ftoi9P,跨接开关 QFM13 和 BrE9 在 0.223 s 时彻底分断电流。

(3) 跨接线外部三相短路 F3。差动装置没有发出开关动作信号,跨接开关 QFM13 和 BrE9 不动作。

(4) 发电机出口三相短路 F4。差动装置在 0.210 s 时发出开关动作信号 Ftoi9P,发电机出口开关 QFA1 在 0.224 s 时彻底分断电流。

(5) 发电机出口两相短路 F5。差动装置在 0.212 s 时发出开关动作信号 Ftoi9P,发电机出口开关 QFA1 在 0.223 s 时彻底分断电流。

(6) 发电机出口外部三相短路 F6。差动装置没有发出开关动作信号,发电机出口开关 QFA1 不动作。

跨接线 13 发生三相短路 F1 的波形如图 5 所示,差动保护装置在短路发生 4 ms 后即判断出故障并发出动作信号,跨接开关 QFM13 和 BrE9 在收到信号后开始动作,由于 Hypersim 中开关为理想模型,不能反映拉弧过程,必须在电流过零点才能真正切断电流,因此三相开关分别在电流过零时才断开。

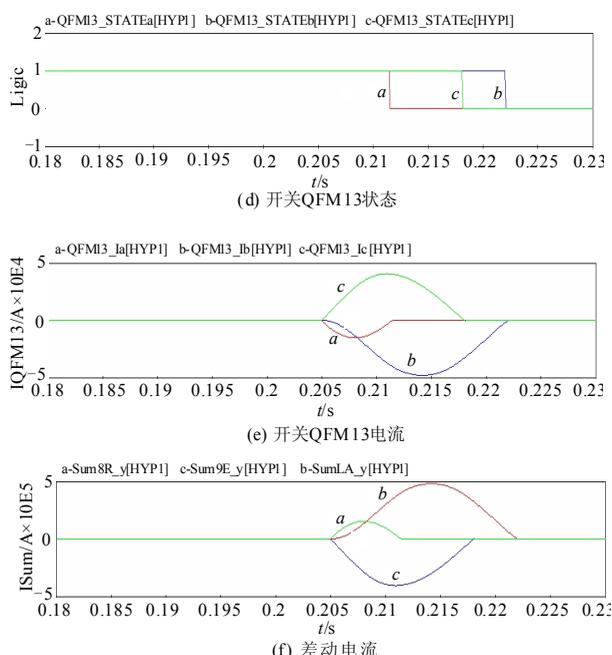
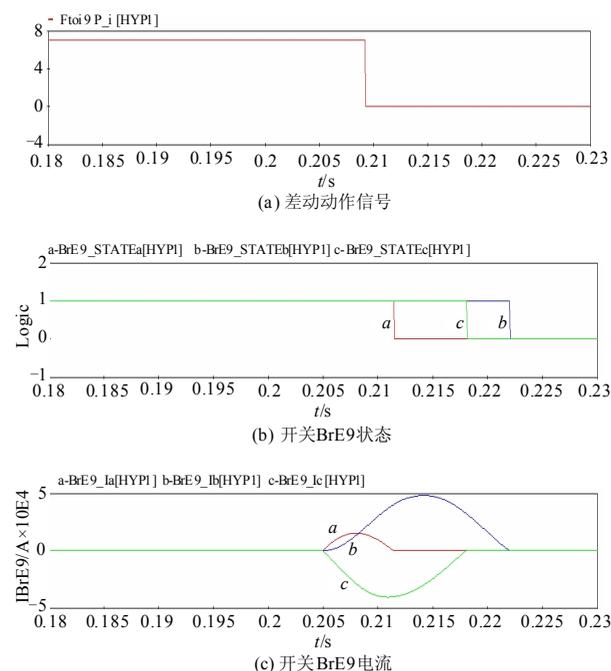
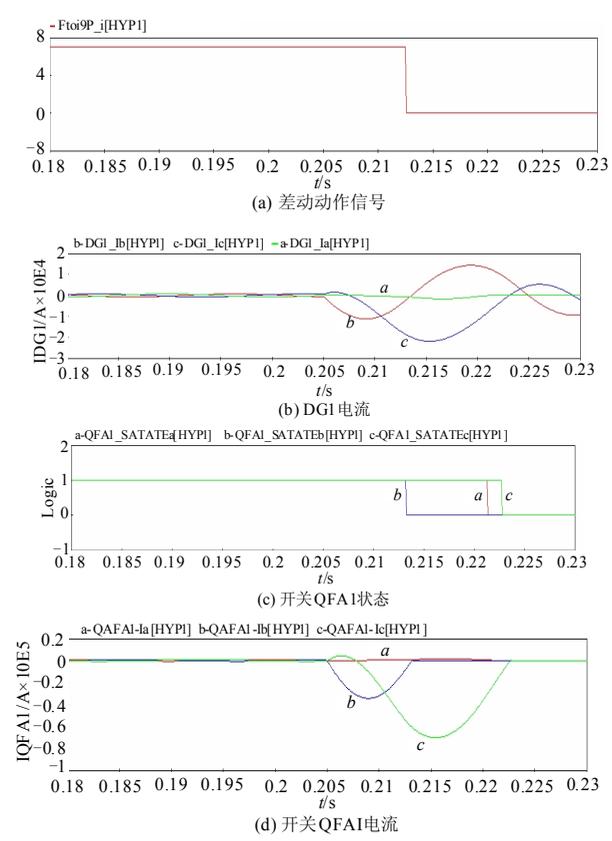


图 5 跨接线三相短路故障波形  
Fig.5 Waveforms of 3-phase short-circuit fault in jumper line

发电机出口两相短路 F5 的波形如图 6 所示,差动保护装置在短路发生 7 ms 后即判断出故障并发出动作信号,发电机出口开关 QFA1 断开以切断短路故障。



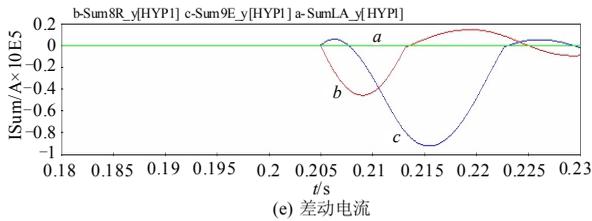


图6 发电机出口两相短路故障波形

Fig.6 Waveforms of phase to phase short-circuit fault at the generator terminal

## 5 结论

当差动保护区域内发生短路故障后（包括相间短路），差动保护装置能够迅速地检测出故障的发生，并且发出开关跳闸信号；当差动保护区域外发生短路故障时，差动保护装置不会动作，能够实现选择性保护。通过 Hypersim 实时仿真系统构建的闭环测试系统运行结果正确，能够用于保护、控制设备的实时仿真实验。

## 参考文献

- [1] 柳勇军, 闵勇, 梁旭. 电力系统数字混合仿真技术综述[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 38-43.  
LIU Yong-jun, MIN Yong, LIANG Xu. Overview on power system digital hybrid simulation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 38-43.
- [2] 杨佳, 杨洪涛, 等. 基于Hypersim实时仿真系统的备自投装置测试[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 117-121.  
YANG Jia, YANG Hong-tao, et al. Automatic switchover device test based on hypersim real-time simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 117-121.
- [3] 郑三立, 黄梅, 等. 基于微机数字仿真的实时闭环测试系统[J]. 华北电力技术, 2004(6): 21-24.  
ZHENG San-li, HUANG Mei, et al. Real-time closed loop testing system based on PC digital simulation[J]. North China Electric Power, 2004(6): 21-24.
- [4] 朱革兰, 李海锋, 王钢. 电流闭锁式母线快速保护系统分析与实时仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 57-59, 64.  
ZHU Ge-lan, LI Hai-feng, WANG Gang. Analysis and real-time simulation of current blocking fast busbar protection system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 57-59, 64.
- [5] 杨星星, 张沛超, 等. 基于多线程技术的数字保护实时仿真系统[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 73-76.  
YANG Xing-xing, ZHANG Pei-chao, et al. A real-time digital protection simulation system based on multi-thread technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 73-76.
- [6] 周保荣, 房大中, 等. 全数字实时仿真器—HYPERSIM[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 79-82.  
ZHOU Bao-rong, FANG Da-zhong, et al. The fully digital real-time simulator—HYPERSIM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 79-82.
- [7] 张超, 庄劲武, 等. Hypersim在密集节点独立电力系统实时仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2005, 22(12): 14-16, 37.  
ZHANG Chao, ZHUANG Jing-wu, et al. Application of hypersim to real-time simulation of dense nodes Absolute power system[J]. Computer Simulation, 2005, 22(12): 14-16, 37.
- [8] 庄伟民. 差动保护比率制动整定中动作电流与制动系数等关系分析[J]. 继电器, 2000, 28(9):23-24, 42.  
ZHUANG Wei-min. Analysis of the relationship between operation current and restraint coefficient for ratio restraint setting of differential relay[J]. Relay, 2000, 28(9):23-24, 42.
- [9] 杨洪涛, 卜一凡, 等. 基于Hypersim的变电站自动化系统闭环测试环境的建立[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 79-82.  
YANG Hong-tao, BU Yi-fan, et al. Hypersim-based closed-loop test environment for substation automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11):79-82.

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-07-16

作者简介:

方明(1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: fangming77190@163.com

付立军(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统仿真及安全稳定运行;

叶志浩(1975-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与安全运行。