

基于 Hypersim 的变电站自动化系统 闭环测试环境的建立

杨洪涛¹, 卜一凡², 梁志成¹, 施玉祥¹, 杨佳¹, 吴骞¹

(1. 国网南京自动化研究院, 江苏 南京 210003;

2. 江苏省宏源电力建设监理有限公司, 江苏 南京 210005)

摘要: 介绍了一种基于 Hypersim 变电站系统闭环测试的方法。在 Hypersim 中实时仿真变电站运行, 并将被测装置所需要的电压、电流和开关位置信号输出, 装置的控制信号再返回 Hypersim 中, 从而形成变电站自动化系统装置的闭环测试环境。Hypersim 主要完成电力系统网络的构建, 并对网络进行分析、映射任务、生成代码。详细叙述了在 Hypersim 中建立仿真闭环测试环境模型、解耦元件、参数设置、负荷变动的脚本、与被测装置闭环连接等。从仿真变电站运行情况看, 所介绍的方法能方便地研究被测装置与仿真变电站的相互作用。

关键词: Hypersim; 变电站自动化系统; 实时数字仿真; 闭环测试

中图分类号: TM 762.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0079-04

当前对变电站自动化系统的测试相对比较落后, 只检查其硬件回路是否完好。测试时对每个装置的遥测、遥信和遥控众多端口进行独立测试, 劳动强度大、效率低, 繁琐易疏忽出错, 也不够方便和直观。

用实时数字仿真器对装置闭环测试, 当前只是对单台保护或控制装置做过, 对变电站自动化系统装置进行整体的系统化测试还未见报道。这里介绍在并行计算技术的电力系统全数字实时仿真系统在 Hypersim 中建立变电站的仿真模型, 提供变电站自动化系统装置的整体功能和性能的测试环境, 为进一步对其进行测试打下基础。

1 Hypersim 实时数字仿真系统

Hypersim 软件主要包含 Hypersim、Hyperview、Scopeview 这 3 个软件模块。

1.1 Hypersim^①

在 Hypersim 主要完成电力系统网络的构建, 并对网络进行分析、映射任务、生成代码。

Hypersim 有编辑和仿真 2 种模式。

编辑模式下, 提供了大量电力系统和控制系统元件模型, 用户可根据实际电力系统的一次接线图在 Hypersim 中挑选相应电力系统元件的模型构成电力系统, 也可输出电力系统的量接入控制系统中进行一些处理和完成一定的控制功能。

仿真模式下, Hypersim 对网络进行分析, 如果一次系统图有不合理之处, 会给出 error 和 warning, 提示用户进行修改, 之后用户就可以映射任务、生成代码、运行仿真。如果想监视系统中的某些量, 可灵活地对相应的元件安装 sensor 将其输出, 这样 Scopeview

中就可读入这些量并进行采集和绘图。运行仿真前, 需设置好仿真步长, 选择在线或离线运行。

1.2 Hyperview

Hyperview 中可以完成一些特殊的功能, 如: 潮流计算、Snapshot、线路参数计算。

潮流计算根据用户在 Hypersim 中设置的网络的母线电压基值和发电机出力进行计算, 要注意必须选定一个发电机作为平衡机。用户可以利用潮流计算的结果更新网络中发电机运行参数, 也可以利用潮流结果初始化整个网络, 使一开始运行仿真就可以进入稳定状态。

Snapshot 具有快照功能, 可记录整个网络某一时刻的状态, 并存入文件中, 以后再运行仿真时, 可以读入该文件, 则系统直接进入该状态而不需经历中间过程。一般运行仿真后, 在系统达到稳态时, 对网络拍快照。

线路参数计算主要完成由线路的几何参数计算线路的电气参数, 该面板让用户输入各相线路的位置、导线的几何尺寸, 之后即可计算出线路的电气参数, 可以很方便地导入 Hypersim 中所绘制的相应线路中。在 Hyperview 中, 可以启动 Hypersim、Scopeview。

1.3 Scopeview^②

Scopeview 是数据采集、波形显示和信号处理软件, 它支持很多数据格式, 包括: EMTP、Matlab 和 COMTRADE。

在 Hypersim 中设置好 sensor, Scopeview 才能读入这些量。

Scopeview 支持基本的数学运算, 还带有很多函数, 可对 sensor 处理。可利用 POW 模块提供的同步

① TransEnergie Technologies. Hypersim tutorial. 2006.

② TransEnergie Technologies. Hypersim scope view. 2006.

信号,在相同相位下进行采集。能够对波形缩放,可清楚表现波形的细节,并能将波形叠加以便于比较。

2 变电站自动化系统闭环测试环境建立

在 Hypersim 的编辑模式中,使用其提供的电力系统元件搭建变电站模型,适当对其解耦使其适合仿真步长,并设置好参数,为了更逼真地模仿变电站需要使负荷按照预定的要求变动。

2.1 在 Hypersim 中建立仿真变电站模型

Hypersim 元件库中,提供了电源、可调分接头变压器、故障线路和负荷的模型,可方便地按照典型的变电站接线图,构建起变电站模型。

a. 电源。着重研究变电站自动化系统整体的一些功能和性能,不研究单个装置的保护功能,保护功能测试可以在 Hypersim 中专门构建简单的网络对其进行细致的测试。仿真变电站在相对稳定的状态下运行,只需考虑受到小扰动情况下系统的响应,属于一个准稳态过程,不用考虑电磁暂态情况。故此使用恒压源即可,且仿真时间步长也可选择大些。

b. 变压器。考虑到变电站自动化系统的电压无功控制功能需要调节变压器分接头,这里使用双绕组可调分接头变压器,500 kV/220 kV, Y/Δ-11。500 kV 侧母线用 3/2 接线,220 kV 侧用双母线接线,共 8 条出线。

c. 线路和负荷。仿真的目的并非主要考虑单个保护装置的功能,在这里线路使用单回线分布参数模型,分布参数线路自然解耦,可以减轻主任务负担,负荷使用恒阻抗模型。

2.2 对仿真变电站解耦

分布参数线路使得信号从一端传播到另一端有一段延迟,延迟时间长短与线路长度有关,这样一个网络中,分布参数线路两端会自然解耦分成 2 个任务,线路单独作为一个任务,只要保证仿真步长小于线路的传播延迟,就可对其进行并行计算^[1]。

Hypersim 中的每种元件均有一个估计的计算时间,每个子任务根据其中含有的不同种类的元件数目和元件时间,再加上通信时间,即可估算出该任务的执行时间。如果某任务的最大估算时间大于所设置的仿真步长,则无法映射任务,应该增加仿真步长^①。

在变电站仿真中,母线常常会连接很多断路器,节点数目很多,这样会使任务的估算时间常常大于仿真步长,这时需要在网络中适当的位置加入 Decouple (解耦)元件对变电站进行分解,被分开的部分属于不同的子任务,每个子任务的运行时间也降低了,在不改变仿真步长的情况下,可以进行任务映射^[2]。

Decouple 使得网络被人为解开,被解开的两端信号有一个时间步长的延迟,一般情况下这种微小延迟引起的误差很小,但是若在 Decouple 元件附近发生故障时影响较大,所以 Decouple 元件最好远离故障。

若对变压器两侧加上解耦元件,把 500 kV 和 220 kV 解开;220 kV 侧有 8 条出线,含有很多断路器,

也可以在 220 kV 的某些出线上加解耦元件,减小 220 kV 母线的任务。

仿真变电站网络在解耦前,220 kV 和 500 kV 两侧为一个子任务,是网络中最大的子任务,有 175 个节点,求解需要耗费 103.9 μs,再考虑通信时间,该任务的执行时间大约 120 μs,则仿真步长要大于 120 μs;而解耦后 220 kV 和 500 kV 被分解成 2 个子任务,500 kV 侧子任务最大,有 55 个节点,估计执行时间为 50 μs,此时仿真步长要设为 65 μs 即可运行仿真。

2.3 参数设置

a. 断路器。Hypersim 中断路器参数主要是打开电阻和闭合电阻。其默认参数闭合电阻为 0.001 Ω,相对负荷电阻已非常小;打开电阻为 10⁶ Ω,已相当大。所以采用断路器默认参数对一次系统影响并不大。

b. 电源。电压源参数主要有电压模值、相位和频率,内阻抗。电压可根据系统电压等级和频率来设定,而内阻抗可以根据系统的短路容量计算得到。可取短路容量为正常运行时容量的 10 倍,正常运行时电源有功和无功可以从 Hypersim 中获得,可设三相短路容量为 S,电压源相电压有效值为 U,则可求出电压源内阻抗 Z 为

$$S = \frac{U^2}{Z} \times 3, \quad Z = \frac{U^2}{S} \times 3$$

电阻相对于电抗太小,可以认为电抗 X 等于阻抗 Z,故可求出电感 $L = X / (2\pi f)$,电阻值可取 Z 的 1/50。

c. 变压器。变压器参数主要有绕组电压和漏阻抗。绕组电压可根据其各侧所连接的母线电压和连接方式计算得到。如果母线电压基值为 U;当绕组为三角形连接时,则绕组电压为 U;当绕组为星形连接时,则绕组电压为 $U/\sqrt{3}$ 。漏阻抗可以根据变压器的短路电压百分比来计算,得到一次侧和二次侧总阻抗值后,按标么值相等平分给一次侧和二次侧。

d. 线路。线路参数分换位和不换位 2 种,换位线路参数主要有零序及正序的电阻、电感和电容。同一电压等级的线路参数相差并不大,所以可使用典型参数,220 kV 线路可取 $Z_0 = 0.237 + j0.731 \Omega/\text{km}$, $Z_1 = 0.045 + j0.317 \Omega/\text{km}$ 。保护装置的二次参数根据一次线路参数而定,具体计算如下:

设线路的一次阻抗为 $Z_1 = U_1/I_1$,电压互感器变比为 $k_U = U_1/U_2$,电流互感器变比为 $k_i = I_1/I_2$,则可计算线路二次阻抗为

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1/k_U}{I_1/k_i} = \frac{U_1}{I_1} \frac{k_i}{k_U} = Z_1 \frac{k_i}{k_U}$$

e. 负荷。负荷采用恒阻抗模型,其参数主要有电阻和电感,可以以功率的方式输入。负荷应与电源出力相适应。最关键的是当用 Hypersim 对变电站进行仿真时,要能够仿真出真实变电站中负荷的变动,所以需要能在仿真运行中,实时改变负荷参数。

2.4 负荷变动的脚本

实际中的变电站其负荷随着时间在变化,连续地

① TransEnergie Technologies. Hypersim hardware guide manual, 2005.

对变电站中产生小的扰动,而上面在 Hypersim 中建立的变电站模型,其负荷在仿真运行后不变,这样的变电站只是一个静止的变电站,与实际的变电站有比较大的差别。所以需要在仿真运行时,使得负荷按照一定的规律随时间变动,就更符合实际情况。

Hypersim 提供了在仿真运行时,改变元件参数的脚本命令 `cgdev`^①,用来改变网络中各个元件的参数值,参数的改变在仿真中立即生效,不需要停止仿真就对网络中的电压、电流波形产生影响。

Linux 中的 shell,不仅提供了大量的命令,而且提供了选择、循环的控制语句,可以自定义变量、数组,支持数学运算,可处理命令行参数,也有一些内置的函数如: `sleep`。

因此,可以编写 Linux 的 shell 程序,按照一定的规律在仿真运行中改变变电站中负荷的大小。

编写 Linux 的 shell 程序时,主要用 shell 提供的 `sleep` 函数控制负荷变动的的时间间隔,用 `while` 循环使得负荷变动可循环进行,用 `cgdev` 设置网络中各负荷的电阻值和电感值,用 `if` 可检查参数,处理 shell 程序中可能出现异常,从而使程序更强壮。

用 Linux shell 编写的控制负荷阶梯变化的波形(每 7 s 变化 1 次,对应于 1 d 中的 1 h),见图 1。

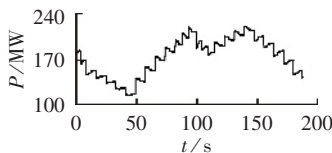


图1 负荷变动波形

Fig.1 Waveform of load change

图 1 中,如果将负荷变化时间缩短,可以使负荷曲线变得平滑。

3 与被测装置闭环连接^[3-4]

在 Hypersim 中仿真变电站的模型建立完成后,就需要将 Hypersim 与变电站自动化系统装置连接以形成闭环测试环境。

在仿真模式下设置 Sensor 面板,可将仿真变电站中母线电压、线路电流通过 Hypersim 的 DA 端口输出,各断路器位置通过 DO 端口输出,被测装置的控制信号通过 DI 端口采集。

Hypersim 中 DA 端口输出的均是小信号电压量,必须经过功率放大器放大成二次侧额定电压或电流后才能提供给被测装置;DO 端口输出的断路器位置信号也需要经过开关量转换装置隔离后接入被测装置,变压器分接头位置可先将其进行 BCD 编码,然后再通过 DO 端口输出;被测装置输出的控制信号需经过 DI 端口采集到 Hypersim 中的控制模块从而控制仿真变电站中的断路器的合分^[5-8]。

Hypersim 与被测装置闭环连接示意图见图 2。

与变电站自动化系统装置闭环连接好后,需要在 Hypersim 中设置好 Scaling 方能开始运行仿真。

4 变电站仿真波形

测试环境建好后,即可方便地对变电站自动化系

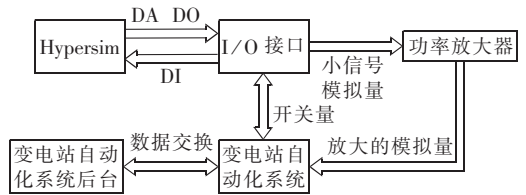


图 2 Hypersim 与变电站自动化装置闭环连接示意图

Fig.2 Closed-loop connection of Hypersim with substation automation devices

统装置进行整体的、闭环的测试,如:电压无功综合控制、备用电源自投控制、雪崩试验等。

在 Hypersim 中可以在仿真运行时修改网络中元件的参数。可以方便地控制各断路器的分合闸,并能精确控制其分闸和合闸时间;可以修改负荷大小,改变网络负载的轻重;可以设置 monitor 实时监控仿真网络中电压、电流、断路器位置;可以模拟振荡、雪崩等现象,考察被测装置的响应情况。

运行仿真后,用 Scopeview 采集正常情况和故障情况下仿真变电站中各母线电压和线路电流的波形。

由图 3~6 可见,Hypersim 中的仿真变电站在正

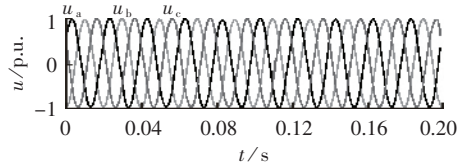


图 3 稳态情况下 220 kV 侧母线电压波形

Fig.3 Voltage of 220 kV bus at steady state

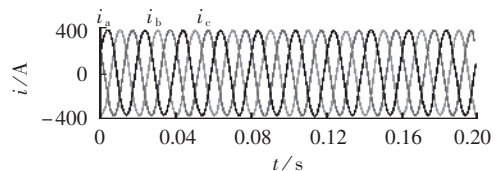


图 4 稳态情况下 220 kV 侧出线 1 电流波形

Fig.4 Current of 220 kV feeder line 1 at steady state

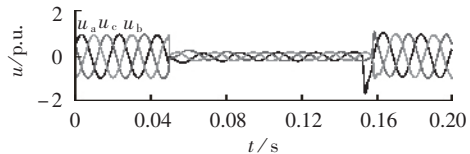


图 5 220 kV 侧出线末端三相短路故障(故障时间 0.05~0.15 s) 母线电压波形

Fig.5 Bus voltage when three-phase short-circuit fault(0.05~0.15 s) occurs at the end of 220 kV feed line 1

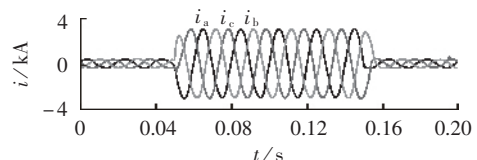


图 6 220 kV 侧出线 1 末端三相短路故障(故障时间 0.05~0.15 s) 线路电流波形

Fig.6 Line current when three-phase short-circuit fault(0.05~0.15 s) occurs at the end of 220 kV feeder line 1

①TransEnergie Technologies. Hypersim CGDEV batch processing,2006.

常和故障情况下,电压和电流波形与真实电网中正常和故障情况下波形一致,在此环境下可以很方便地对变电站自动化装置进行较全面的整体功能和性能测试。

5 结论

在 Hypersim 中构建变电站模型、解耦元件、设置参数、编写负荷变动脚本、调试,使仿真变电站能够正确运行,接着将仿真计算的电压电流信号、开关位置信号输出给变电站自动化系统装置,装置的控制信号再返回到仿真变电站中,从而构成变电站自动化系统闭环测试的环境^[9-10]。

正常和故障情况下的电压和电流仿真波形均符合真实情况,负荷也能按照 Linux shell 脚本中设置好的值进行变动,闭环测试环境更符合变电站自动化系统的真实运行情况,能很好地研究被测装置与仿真变电站的相互作用^[11]。

参考文献:

- [1] 周保荣,房大中,SNIDER L A,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,SNIDER L A,et al. The fully digital real-time Simulator—Hypersim[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(19):79-82.
- [2] 张超,庄劲武,戚连锁,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.
ZHANG Chao,ZHUANG Jin-wu,QI Lian-suo,et al. Application of Hypersim to real-time simulation of dense nodes absolute power systems[J]. Power System Simulation,2005,22(12):14-16.
- [3] 郑三立,黄梅,胡明亮,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,HU Ming-liang,et al. Real-time closed loop testing system based on PC digital simulation[J]. North China Electric Power,2004(6):21-24.
- [4] 吴涛,苏为民,姚谦,等. 用 RTDS 进行自动励磁调节器性能检测试验[J]. 华北电力技术,2005(8):4-7.
WU Tao,SU Wei-min,YAO Qian,et al. Automatic voltage regulator testing using the RTDS simulator[J]. North China Electric Power,2005(8):4-7.
- [5] 肖仕武,刘万顺,秦立军,等. 基于 PC 机实时数值计算的继电保护闭环测试[J]. 华北电力大学学报,2000,27(3):6-10.
XIAO Shi-wu,LIU Wan-shun,QIN Li-jun,et al. A real-time closed-loop relay test system based in the numerical calculation by a PC[J]. Journal of North China Electric Power University,2000,27(3):6-10.
- [6] 郑三立,范瑜,黄梅,等. 微机闭环测试继电保护装置的预仿真[J]. 电工技术学报,2004,19(5):97-101.
ZHENG San-li,FAN Yu,HUANG Mei,et al. Pre-simulation of PC based closed-loop testing for protective relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(5):97-101.
- [7] 赵志民,秦立军,刘世民,等. 继电保护测试技术的现状与发展[J]. 现代电力,2002,19(1):43-48.
ZHAO Zhi-min,QIN Li-jun,LIU Shi-min,et al. Status and developments of relay protection testing technology[J]. Modern Electric Power,2002,19(1):43-48.
- [8] 冯小玲,郭襄,谭建成. 实时数字仿真系统(RTDS)在继电保护上的应用研究[J]. 国际电力,2005,9(4):43-47.
FENG Xiao-ling,GUO Niao,TAN Jian-cheng. Researches and applications of real-time digital simulation system to relay protection[J]. International Electric Power for China,2005,9(4):43-47.
- [9] 李保福,李营,王芝茗,等. RTDS 应用于线路保护装置的动模试验[J]. 电力系统自动化,2000,24(15):69-70.
LI Bao-fu,LI Ying,WANG Zhi-ming,et al. Comprehensive test of protective relays on different ends of long transmission line by RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(15):69-70.
- [10] 郑三立,雷宪章,RETZMANN D,等. 电力系统计算机及实时数字仿真[J]. 电力系统自动化,2001,25(13):45-49.
ZHENG San-li,LEI Xian-zhang,RETZMANN D,et al. Computer and real-time digital simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(13):45-49.
- [11] 叶林,杨仁刚,杨明皓,等. 电力系统实时数字仿真器 RTDS[J]. 电工技术杂志,2004(7):49-52.
YE Lin,YANG Ren-gang,YANG Ming-hao,et al. Real time digital simulator and its applications[J]. Electrotechnical Journal,2004(7):49-52.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

杨洪涛(1981-),男,湖北襄樊人,硕士研究生,从事电力系统数字仿真研究工作(E-mail:yhthbxf@163.com);

卜一凡(1972-),男,江苏南京人,工程师,硕士,主要从事电力工程建设管理工作;

梁志成(1960-),男,江苏盐城人,高级工程师,博士,主要从事电力系统实时数字仿真、电力系统自动化设备检测技术及电磁兼容技术的研究;

施玉祥(1968-),男,浙江嘉兴人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统自动化装置的研究和开发工作。

Hypersim-based closed-loop test environment for substation automation system

YANG Hong-tao¹,BU Yi-fan²,LIANG Zhi-cheng¹,SHI Yu-xiang¹,YANG Jia¹,WU Qian¹

(1. Nanjing Automation Research Institute,Nanjing 210003,China;

2. Jiangsu Hongyuan Electric Power Construction Supervision Co.,Ltd.,Nanjing 210005,China)

Abstract: A closed-loop test environment based on Hypersim is introduced. Substation operation is simulated in Hypersim. The voltage,current and breaker states needed are sent to the device tested,while the control outputs of the device tested are fed back to Hypersim,forming a closed-loop test environment for substation automation devices. Hypersim is mainly used to establish the power system network,analyze the network,map tasks and create codes. The foundation of test environment,element decoupling,parameter setting,script of load change,and closed-loop connection with the device tested are described in detail. Simulation proves its effectiveness.

Key words: Hypersim; substation automation system; real-time digital simulation; closed-loop test