

基于稳态仿真技术的智能变电站 仿真测试装置研究与开发

集中集成测试模式已在国家电网公司智能变电站建设中得到了广泛应用，但测试手段仍然停留在分装置单体测试的阶段，测试周期长、覆盖率低，无法保证测试过程的完整性和正确性。从智能变电站的技术特点和目前全数字仿真系统的缺点出发，设计了一种适用于智能变电站集中集成测试的仿真测试装置，具备模型简单、测试全面和易于操作等优点，可有效提高测试的效率和覆盖率。

秦 健 王 展/国网江苏省电力公司

张正洋 石 慧 姬 慧/国网江苏省电力公司扬州供电公司



秦 健/高级工程师

由于智能变电站^[1,2]具备信息共享化、网络化的技术特点，与常规变电站相比其系统集成度得到了极大提升，系统对通信网络可靠性的要求也随之增强，传统的现场安装调试的模式难以被有效实施。

目前，国家电网公司已经提出了集中集成测试模式^[3,4]，并得到了良好效果，在以后的智能变电站建设中必将得到广泛应用。但是，由于缺乏全站级的测试平台，测试手段仍然停留在分装置单体测试阶段，测试周期长、覆盖率低，无法保证测试过程的完整性和正确性。因此，有必要引入全数字仿真系统^[5]，同时模拟全站的一次系统和过程层设备的各种运行工况，实现智能变电站全站级测试，提高集中集成测试的效率。

本文从智能变电站的技术特点和目前全数字仿真系统的缺点出发，设计了一种适用于智能变电站集中集成测试的

仿真测试装置，具备模型简单、测试全面和易于操作等优点，可有效提高测试的效率和覆盖率。

系统总体结构

目前，国内外的主要电力系统全数字仿真系统均采用了电磁暂态仿真技术，可真实模拟电力系统的动态过程，在电力系统研究、新型继电保护原理和装置的前期开发与验证、保护定值整定、继电保护和二次系统测试等方面得到了广泛应用。但是，在性能优越、功能全面的同时，这些仿真系统也存在一系列的缺点，阻碍了其在智能变电站测试方面的应用，主要包括以下几点。

1) 建模过程复杂、周期长、可重复性差及元件参数多，对测试人员的专业水平和熟练程度要求高。

2) 仿真规模有限（性价比低下）、系统扩展困难、前期投入及中期维护成本高。

3) 输出信号为小信号电压模拟量，需要增加额外的信号转换装置才能满足智能变电站测试的要求。

因此，本文设计了一套适用于智能变电站全站级测试的仿真测试装置（以下简称“装置”），同时模拟全站的一次系统、合并单元和智能终端的各种运行状态，并能接收以及响应跳闸、合闸命令，实现闭环测试。由于智能变电站采用SV报文传输模拟量信息，采样率仅为4 kHz，因此装置采用了更易实现和应用的稳态仿真技术。

关键词/Keywords

智能变电站 ·
全站级测试 ·
仿真测试装置 ·

国家电网公司科技项目：220 kV及以下智能变电站二次系统标准化建设研究与应用（J2014081-1）。

装置总体结构如图1所示，包括人机交互单元、稳态仿真单元、数据采集单元和实时数据输出单元。各部分功能如下。

1) 人机交互单元。提供人机交互界面，建立并管理仿真模型（包括一次接线图和元件参数），对仿真测试过程进行控制等功能。

2) 稳态仿真单元。采用稳态仿真原理，模拟电力网络的运行，输出电压、电流和开关位置等电力数据，并根据待测系统的反馈实时更新电力数据。

3) 数据采集单元。采集待测系统反馈的数据，从中提取跳闸、合闸等信息，并传送给稳态仿真单元。

4) 实时数据输出单元。将稳态仿真单元生成的电力数据转换成SV、GOOSE报文并实时输出。

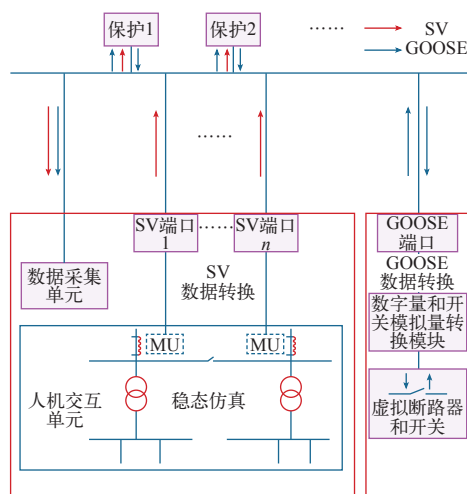


图1 智能变电站全站仿真测试装置总体结构图

装置仿真测试流程说明如下。

1) 为该系统输入一次模型，包括母线、线路、变压器、互感器和断路器等一次设备，并可设置故障位置和故障类型，根据当前断路器的位置信息，通过稳态潮流和短路计算得到互感器的电压、电流信息，同时输出断路器的位置信息。

2) 该系统模拟了过程层的合并单元和智能终端，根据智能变电站的配置文件进行以下关联：互感器和合并单元的关联；断路器位置、保护动作信号与智能终端的关联。

3) 步骤2的关联完成之后，所模拟合并单元

和智能终端将步骤1计算出的数据输出给继电保护装置、测控装置等二次设备。其中，互感器的电压、电流信息以IEC61850-9-2报文方式输出，断路器的位置信息以GOOSE报文输出。

4) 该系统接收继电保护测试装置发送的GOOSE、MMS报文，并提取其中的保护动作信号，并结合测试要求更改断路器的位置信息，同时重新计算互感器的电压电流信息，即步骤1，从而形成闭环测试。

硬件设计

1. 机箱结构

装置的硬件平台采用6U 19英寸标准机箱，机箱背板采用工业级高速PCIE总线板，布置1个电源板卡、1个CPU板卡和10个业务板卡，业务板卡包括2种类型：光网口板卡和开关量板卡。系统插件配置如图2所示。

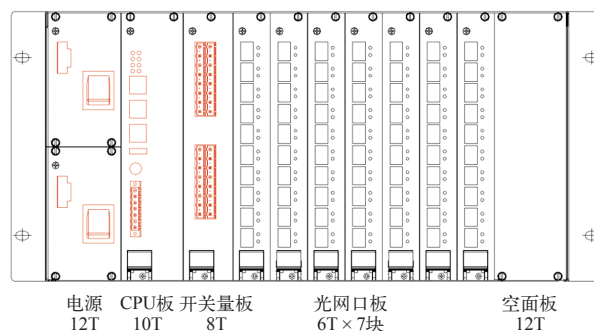


图2 系统插件配置图

2. CPU板卡

CPU板卡主要负责仿真数据的实时计算、光数字报文编解码和与上位机通信等功能。CPU采用飞思卡尔的P2020双核处理器，采用45 nm技术低功耗平台，主频为1.2 GHz。P2020处理器集成了一套丰富的接口，其中包括SerDes、千兆以太网、PCI-Express、RapidIO®技术和USB。3个10/100/1 000以太网端口支持先进的数据包分析、流量控制和服务质量等特性，以及IEEE®1588时间标志。4个SerDes巷道可在2个串行RapidIO端口、3个PCI Express端口以及2个SGMII端口之间进行分配。

CPU通过多种类型、不同速率的总线与DDR3

存储器、CPLD、FGA、E²PROM、FLASH、USB接口和串口等设备部件连接。CPU板卡与业务板卡之间通过高速PCIE总线和独立IO，分别传输数据和控制信号，其结构如图3所示。

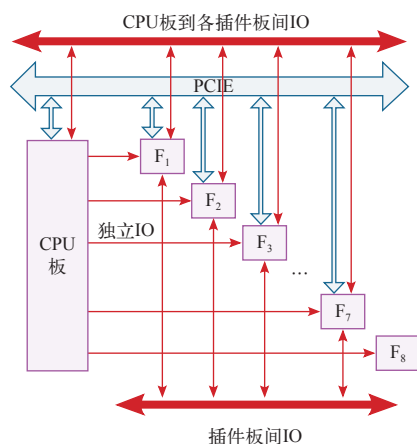


图3 CPU到背板总线图

3. 业务板卡

业务板卡负责仿真测试过程中各种类型的业务数据的传输，包括两种类型：光网口板卡和开关量板卡。

光网口板卡用于连接过程层设备及过程层交换机，每个板卡具备8对100 M光纤以太网接口，其原理如图4所示。

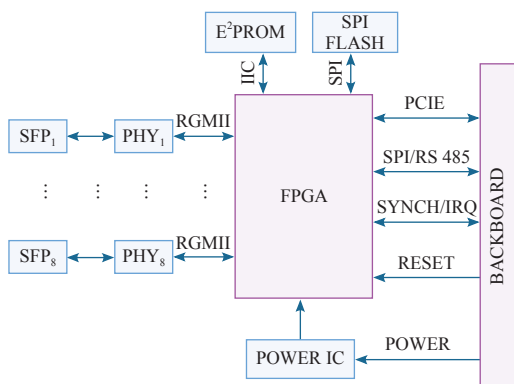


图4 光网口插件原理图

开关量板卡用于输入、输出开关量硬接点，其原理图如图5所示。

仿真测试流程

1. 模型编辑

模型编辑的作用是根据智能变电站的实际情

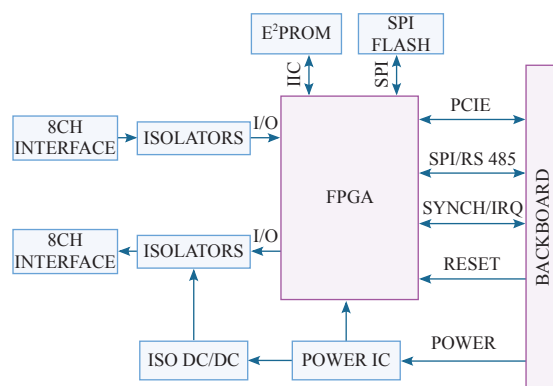


图5 开关量插件原理图

况选择一次元件、绘制一次接线图和设置元件参数，构建仿真模型。装置在设计之初就定位在智能变电站的工程测试而非原理验证上，因此对一次元件的类型、模型和参数进行了优化，以简化现场应用时配置和操作的流程。例如，交流线路采用Π型集中参数模型^[6]，仅包含正序电阻、正序电抗、零序电阻、零序电抗和线路长度这5个参数，与线路保护装置的定值一一对应；变压器采用等效阻抗串联理想变压器模型，所需参数均可通过变压器的铭牌参数自动计算得出。

另外，模型编辑工具还提供母线、开关、电容器、电抗器、电源和负载等模型。一个编辑完成的模型示例如图6所示。

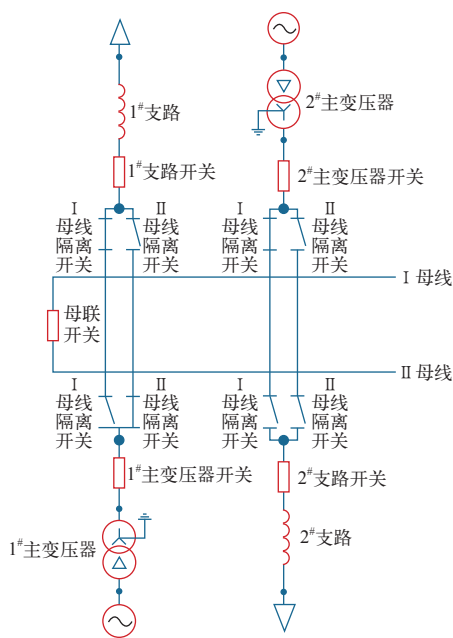


图6 模型示例

2. 网络分析

网络分析的目的在于确定网络的参数并排除网络中的错误，主要包括以下几部分内容。

(1) 子网划分及检查

在电力系统中，通过变压器来连接不同电压等级，处于同一电压等级下的元件具有相同的系统电压。因此，通过隔离开关、开关连接或者直接连接的元件、变压器绕组，划分为一个子网，具有相同的电压等级。

(2) 电源冲突检查

在进行潮流计算时，节点类型分为slack、PV和PQ 3种类型^[7]，由与其相连的电源类型决定，并应满足以下规定：整个网络有且只能有1个slack电源；将所有开关看作导线后，当slack电源和PV电源连接到同一计算节点（由导线互联的所有节点视为同一计算节点）时，其设定的电压幅值相等。

(3) 变压器接线方式检查

连接两个电压等级网络的多个变压器相角差应相等，对直接互联的电压等级网络进行；两个电压等级网络沿不同路径连接时，每条路径的偏转角度应相等，对任意两个电压等级网络进行。

(4) 子网偏转角度计算

软件在进行潮流及短路计算时不考虑变压器的接线方式，仅在输出相量时才对角度进行校正。每个子网下所有元件具有相同的校正角度，该角度的计算方法是：将slack电源所在子网的校正角度 θ 置为0，从slack电源开始遍历整个网络。遍历过程中，如果经过1个非变压器元件，那么将当前 θ 给予该元件；当经过1个变压器元件，对 θ 进行修正（计算偏转角度并相加）并保存。

3. 测试配置

智能变电站采用SV、GOOSE报文传输模拟量和开关量信息，而测试配置的作用是将仿真数据中的电压、电流、开关位置、跳闸信息和合闸信息与SVCB、GOCB的相应通道进行映射，并设置SV、GOOSE报文的输出端口。

模拟量配置将电压、电流映射至SVCB，如图7所示；开关量配置将开关位置、跳闸和合闸信息映射至GOCB，如图8所示；端口配置为SVCB、

GOCB分配发送端口，如图9所示。

通道名称	通道类型	一次额定值	二次额定值	参考值	采样值	通道映射
1 额定延迟时间	时间	-----	50 μ s	1 μ s	0x1	N/A
2 保护电流A相1	电流	600.000 A	5.000 A	1.000 mA	0x1	母联电流-IA(0.000 A, 0.000 V)
3 保护电流A相2	电流	600.000 A	5.000 A	1.000 mA	0x1	母联电流-IA(0.000 A, 0.000 V)
4 保护电流B相1	电流	600.000 A	5.000 A	1.000 mA	0x1	母联电流-IB(0.000 A, 0.000 V)
5 保护电流B相2	电流	600.000 A	5.000 A	1.000 mA	0x1	母联电流-IB(0.000 A, 0.000 V)

图7 模拟量映射

序号	(子)象名称	(子)象类型	初值/子象值	开关列表
1	跳开关1相	单点	false	母联开关
2	跳开关1相	单点	false	跳闸
3	跳开关1相	单点	false	输出1 -> PL2201A220kV线路-保护装置PCS-931GM-D-跳开关1相
4	跳开关1相	单点	false	输出2 -> PL2201A220kV线路-保护装置PCS-931GM-D-跳开关1相
5	跳开关1相失压	单点	false	输出1 -> PL2201A220kV线路-保护装置PCS-931GM-D-跳开关1相
6	跳开关1相失压	单点	false	输出2 -> PL2201A220kV线路-保护装置PCS-931GM-D-跳开关1相
7	跳开关1相失压	单点	false	输出1 -> PL2201A220kV线路-保护装置PCS-931GM-D-跳开关1相
8	跳开关1相失压	单点	false	输出2 -> PL2201A220kV线路-保护装置PCS-931GM-D-跳开关1相

(a) 开入量映射

序号	(子)象名称	(子)象类型	初值/子象值	开关列表
1	合断路器位置	双点	01	母联开关
2	合断路器位置	时间	-----	跳闸
3	合断路器位置	双点	01	合闸
4	合断路器位置	双点	01	合闸位置
5	合断路器位置	双点	01	输出1 -> PL2201A220kV线路-智能终端PCS-2228-1-合断路器位置
6	合断路器位置	时间	-----	输出2 -> PL2201A220kV线路-智能终端PCS-2228-1-合断路器位置

(b) 开出量映射

图8 开入量、开出量映射

选择	AppID	MAC
1	0x4001	01-0C-CD-04-40-01
2	0x4005	01-0C-CD-04-40-05
3	0x4008	01-0C-CD-04-40-08
4	0x4007	01-0C-CD-04-40-07

选择	AppID	MAC
1	0x0101	01-0C-CD-01-01-01
2	0x0103	01-0C-CD-01-01-03

图9 发送端口设置

4. 稳态仿真

装置的稳态仿真采用基于潮流的短路计算原理^[8,9]，是一种基于叠加法的计算方法，能够比较准确地计算正常以及短路情况下的电力网络状态。该原理将网络状态分解为两种状态之和，分别是：不考虑短路故障，仅有网络原有电源作用时的状态，该状态由潮流计算得出；将网络原有电源置零，仅有短路电流作用时的状态。

稳态仿真计算出的电压、电流为相量形式，软件根据采样频率计算采样点，并根据模拟量配置转换成SV报文输出；开关位置会按照GOOSE发送机制转换成GOOSE报文输出。

5. 闭环测试与实时性验证

装置在仿真测试过程中会实时监视用户输入和待测系统的响应，当出现开关位置变化（用户操作或者接收到跳闸、合闸GOOSE报文）、故障位置变化或故障类型变化时，软件都会重新计算

并输出网络状态，从而构成闭环测试。

以图6为例，装置对跳闸、合闸GOOSE报文的响应时间（从GOOSE报文输入至新状态的SV、GOOSE报文输出）在20 ms内，与实际情况下智能终端响应时间^[10]（从GOOSE输入到开出量硬接点输出，约为7 ms）和断路器分合闸时间（10~20 ms）之和相当，实时性能够满足智能变电站仿真测试的要求。

结束语

集中集成测试模式提出了智能变电站全站级测试的要求，而目前已有的全数字仿真系统存在建模过程复杂、前期投入及中期维护成本高以及数据类型不匹配等缺点，无法满足工程应用的需要。本文设计了一种智能变电站仿真测试装置，对一次模型进行了精心优化，所有参数均来自现场定制单，建模过程简单；采用稳态仿真技术，对系统硬件性能的要求大大降低；可直接输出SV、GOOSE报文，无须额外转换装置，无准确度损失；测试过程闭环可控，且能满足实时性的要求。

参考文献

- [1] 李孟超，王允平，李献伟，等．智能变电站及技术特点分析 [J]．电力系统保护与控制，2010，38

(18)：59-62，79．

- [2] 国家电网公司．Q/GDW 383—2009 智能变电站技术导则 [S]．北京：中国电力出版社，2009．
- [3] 高磊，张鹏，陈久林，等．智能变电站一体化集成测试平台设计 [J]．电力建设，2013 (6)：31-35．
- [4] 应站煌，胡建斌，赵瑞东，等．继电保护装置集成测试系统研究和设计 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (17)：142-146．
- [5] 沈冰，邹晓峰．实时数字仿真技术在智能变电站测试中的应用 [J]．华东电力，2012，40 (6)：938-940．
- [6] 李海涛．电力系统分析 [J]．北京：人民邮电出版社，2012．
- [7] 赵晋泉，张伯明．连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用 [J]．电力系统自动化，2005，29 (11)：91-97．
- [8] 陈珩．电力系统稳态分析 [M]．北京：中国电力出版社，2007．
- [9] 周超，熊易，杨俊杰，等．电力系统故障模拟的图形化建模方法 [J]．电力系统保护与控制，2008，36 (17)：32-37．
- [10] 国家电网公司．Q/GDW 1808—2012 智能变电站继电保护通用技术条件 [S]．北京：中国电力出版社，2012．

(收稿日期：2014-03-10) EA

信息动态

斯凯孚 (SKF) 荣获全球能源管理体系认证 ——成为全球范围内第一家荣获 ISO 50001 认证的企业



斯凯孚荣获Den Norske Veritas (DNV) 颁发的ISO 50001全球认证。目前，斯凯孚的能源管理体系已经在遍布全球的38家制造工厂中得以实施采用，这些工厂的能耗超过了集团总直接能源用量的90%。斯凯孚企业社会责任

任总监Rob Jenkinson表示：“我们意识到，我们要大幅提高能源绩效，无论从环境还是从成本方面来考虑，这都是

有益之举。全新的ISO 50001标准有助于我们有组织地以系统和持续的方式来实现这一目标。” Rob Jenkinson还补充道：“提到有助于改善环境绩效的系统和工具，我们于20世纪90年代就开始采用ISO 14001环境管理标准，并且于近期针对新建筑物采用了LEED标准。同时，我们还在能源密集型供应商中推广应用ISO 50001标准。”

ISO 50001标准是斯凯孚集团气候策略的重要组成部分，斯凯孚超越零 (BeyondZero) 的目标是减少斯凯孚及其供应商在运营中的能耗和排放，最重要的是帮助斯凯孚的客户减少能耗和排放。