
智能变电站 HIL 仿真

摘 要

智能变电站的发展支撑着智能电网的发展，同样地继电保护装置和系统支撑着智能变电站的顺利运行，因此继电保护装置是否能够可靠运行十分重要。本文采用 HIL 硬件在环实时仿真的模式，建立智能变电站系统模型，测试继电保护装置和系统。智能变电站 HIL 仿真系统采用 Simulink 电力仿真库和 Matlab 实时操作系统，结合分布式实时同步协议转换器和信号发生器，模拟智能变电站的一次电气设备的真实运行场景和实时状态，测试保护厂商相关的保护系统和装置。该仿真系统采用实时硬件在环和基于开源开放的 Matlab 建模平台的仿真方式，降低了选用专用实时仿真软件的成本，为保护厂商进行集成测试和电网进行设备运行检修提供了的途径，为科研人员和学生提供了开放友好的平台。

本论文基于上述实时仿真系统搭建了 220kV 智能变电站模型，以三项三绕组变压器为核心，分别连接 220kV、110kV 和 66kV 线路，设计了 110kv 线路差动保护，测试和验证了许继继电保护装置的纵联差动保护功能。

关键词：智能变电站；继电保护装置；HIL 硬件在环；Matlab

智能变电站 HIL 仿真

摘 要

智能变电站的发展支撑着智能电网的发展，同样地继电保护装置和系统支撑着智能变电站的顺利运行，因此继电保护装置是否能够可靠运行十分重要。本文采用 HIL 硬件在环实时仿真的模式，建立智能变电站系统模型，测试继电保护装置和系统。智能变电站 HIL 仿真系统采用 Simulink 电力仿真库和 Matlab 实时操作系统，结合分布式实时同步协议转换器和信号发生器，模拟智能变电站的一次电气设备的真实运行场景和实时状态，测试保护厂商相关的保护系统和装置。该仿真系统采用实时硬件在环和基于开源开放的 Matlab 建模平台的仿真方式，降低了选用专用实时仿真软件的成本，为保护厂商进行集成测试和电网进行设备运行检修提供了的途径，为科研人员和学生提供了开放友好的平台。

本论文基于上述实时仿真系统搭建了 220kV 智能变电站模型，以三项三绕组变压器为核心，分别连接 220kV、110kV 和 66kV 线路，设计了 110kv 线路差动保护，测试和验证了许继继电保护装置的纵联差动保护功能。

关键词：智能变电站；继电保护装置；HIL 硬件在环；Matlab

HIL Simulation of Smart Substation

Abstract

The development of smart substations supports the development of smart grids. Similarly, relay protection devices and systems support the smooth operation of smart substations, so it is very important whether the relay protection devices can operate reliably. In this thesis, HIL hardware-in-the-loop soft real-time simulation mode was used to establish an intelligent substation system model and tested relay protection devices and systems. The intelligent substation HIL simulation system used Simulink power simulation library and Matlab real-time operating system, combined with distributed real-time synchronous protocol conversion and signal generator, simulated the real operating scenarios and real-time status of primary electrical equipment in smart substations, test protection systems and devices related to protection manufacturers. The simulation system used real-time hardware-in-the-loop and simulation methods based on the open Matlab modeling platform, which reduces the cost of selecting special real-time simulation software. It provides a way for protection manufacturers to carry out integration tests and power grids for equipment operation and maintenance, and provides an open and friendly platform for researchers and students.

This thesis built a 220kV smart substation model based on the above real-time simulation system, with three three-winding transformers as the core, respectively connecting 220kV, 110kV and 66kV lines, designing 110kV line differential protection, testing and verifying the longitudinal protection relay protection device Linked differential protection function.

Keywords: Intelligent substation; relay protection device; hardware-in-the-loop; Matlab

目录

1 前言	5
1.1 智能变电站 HIL(硬件在环)仿真的意义	5
1.2 常用的电力仿真系统	5
1.3 本论文组织情况	6
2 实时仿真原理	6
2.1 HIL 硬件在环系统	7
2.2 Simulink 与实时仿真机	7
2.3 IEC61850 与协议转换器	8
2.4 继电保护装置	9
3 智能变电站模型的搭建与保护装置的配置	9
3.1 电气接线图	10
3.2 智能变电站仿真模型搭建	10
3.3 继电保护装置配置	16
3.4 设备的互联互通	18
4 验证	19
4.1 捕捉和分析报文	19
4.2 示波器波形变化	20
4.3 继电保护装置动作	21
5 总结与展望	23
参考文献	25
谢 辞	26

1 前言

1.1 智能变电站 HIL (硬件在环) 仿真的意义

智能电网采用去中心化的方式，使得电网变得更加安全、更加清洁，但仍存在由于自然灾害、工作人员误操作、设备老化或者不合格等导致电力系统故障的因素，对社会安全和经济有着很大的威胁。智能变电站是现代电力系统的核心内容，是智能电网建设的重要组成部分，相当于一个能量路由器，主要负责变压和分流，对于智能电网的投建、运行、维护有着关键的作用。继电保护是智能变电站的守护神，是智能电网的核心，肩负着平稳供电、可靠供电的责任，保障电力系统的正常运行，最大限度减少电力系统故障带来的影响。继电保护装置是电力系统继电保护的执行者，因此继电保护装置的各项性能直接影响保护效果。

当前的对继电保护装置的相关测试存在着成本高、系统封闭等问题，本论文所描述的智能变电站 HIL 仿真系统避免了纯物理仿真的局限性和纯数字仿真实验的理想化的问题，具备开放友好的建模平台和软件仿真平台，为继电保护厂商和电网提供保护测试途径，为科研人员和一般的学生教师提供了高性价比的开放测试环境。

1.2 常用的电力仿真系统

随着电力系统规模的不断扩大，涌现了许多优秀的电力系统的仿真系统，主要分为实时仿真和非实时仿真两类，这些仿真系统各有侧重，为电力方面的研发提供了便利，应用较为广泛的有以下几个。

美国联邦纳维尔电力局在 20 世纪六十年代开发了 BPA，但在 1996 年停止了对 BPA 潮流和暂态稳定程序的开发和维护，1984 年由中国电力科学研究院电力研究所在开发和维护。具备电力系统稳态和电力系统暂态等的仿真能力，适用于电网的电力系统规划，但该软件不支持用户自定义。

实时数字仿真系统 RTDS 来自加拿大 RTDS 公司，具有较强的实时性，多用于电磁暂态仿真。但 RTDS 仿真受限于用户所购买设备的 RACK 数，RACK 造价很高，不利于大规模仿真，且系统封闭，对于普通学者而言性价比不高。

PSS/E 出自西门子，用于研究电力传输系统、发电机的稳态和动态功能等，输入输出可根据用户需求设定，功能非常强大，相对以上的系统更加严谨，但是价格非常昂贵，入门难度较大。

以上都是一些比较常用到的电力仿真系统，综合性非常好，为电力系统的研发和维护提供了支持，但大部分软件比较封闭，价格昂贵，对于普通学者并不是那么友好。本论文所述的仿真系统采用集成 Matlab 的具有“实时性”的操作系统和丰富的 Simulink 电力仿真库，具备开放的建模平台和仿真平台，几乎免费，世界几十万使用 Simulink 的电力行业研究者的研究成果直接进入系统，可在平台上使用和分享。

1.3 本论文组织情况

基于以上工作，关于本课题的论述安排如下：

第一章主要阐述了智能变电站的发展现状和智能变电站 HIL 仿真实验的研究意义，讲述了当前比较著名的电力仿真系统以及本论文所描述的智能变电站 HIL 仿真系统所具备的特点，最后介绍本文的内容安排和研究情况。

第二章讲述的是关于硬件在环系统的研究，现实介绍仿真系统的工作原理，再按照硬件在环系统的构成分别对应本论文中的虚拟对象以及实际控制器进行论述，其中包括 Simulink 与仿真机的作用以及继电保护装置的介绍和选择，也包括联系它们的桥梁，即 IEC61850 通讯标准以及协议转换器。

第三章详细介绍了工作安排和本论文仿真系统硬件在环的实现过程，包括系统架构、电力系统仿真建模平台、仿真软件运行环境、分布式实时同步信号发生器的功能以及保护装置的配置通讯要求。基于该仿真系统设计了一个具体 220kV 智能变电站模型，并以电流差动保护为例，设计了相关继电保护装置的实验。

第四章是第三章的实施验证，通过相关软件和测试工具验证仿真系统和保护装置的正确性、同步性、实时性以及系统的仿真故障功能，主要包括报文分析、波形分析和继电保护装置动作分析。

第五章对全文进行了总结并简述了一些新的见解。

2 实时仿真原理

本论文采用的 HIL 硬件在环实时仿真系统基于集成了 Matlab 的实时操作系统，具有开源开放的特点和精密同步的功能，是一种同步实时的分散分布式仿真，由仿真主机、同步网络设备、分布式同步实时协议转换器以及真实的二次设备组成，其工作原理如图 2.1 所示。

仿真主机发出的信号通过通讯同步网络设备 PAC6630 传送到各个仿真终端——分布式同步实时协议转换器，协议转换器将信号以 IEC61850 为标准转换成真实二次设备能理解的信号，再传递到本论文的被测部分——继电保护装置，继电保护装置接收信号后作用于智能终端，控制刀闸和开关，智能终端反馈信息给仿真终端。在该实时仿真系统中，设备之间具有相互矫正的功能，各设备之间实时同步精度相差小于 1 μ s，精度非常高，满足真实电力系统的工作要求。

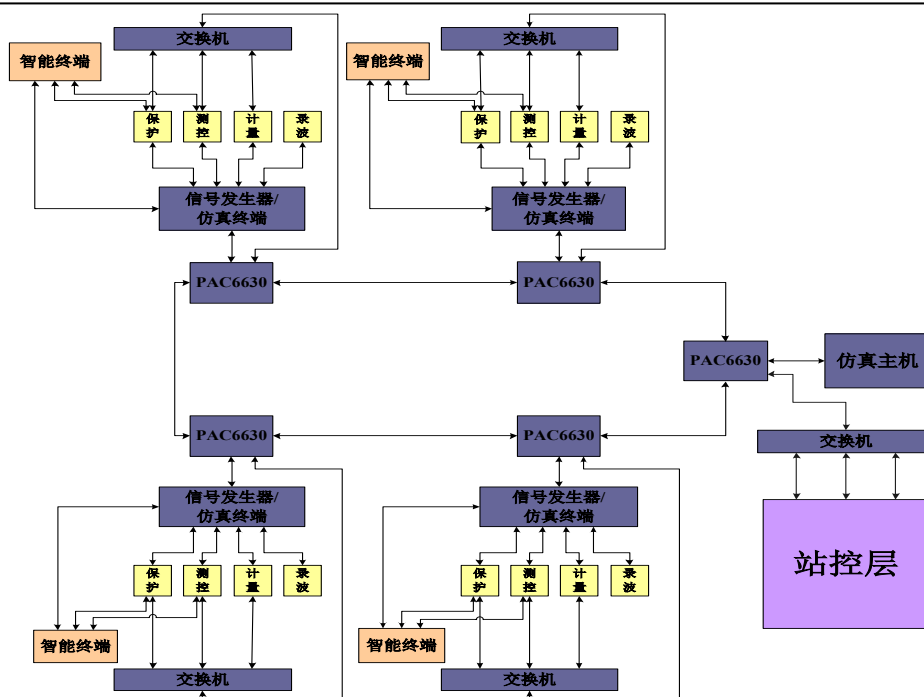


图 2.1 仿真系统工作原理图

2.1 HIL 硬件在环系统

智能变电站 HIL 仿真实验的核心思想就是硬件在环 HIL(Hardware in the Loop)，这里指的是硬件在回路，是一种将计算机仿真和实际的实验设备结合起来的技术，大大降低了开发时间和资金成本的同时明显提高被测装备测试的安全性。HIL 硬件在环仿真测试系统的工作原理是以实时处理器运行仿真模型来模拟受控对象的运行状态，在本论文中实时处理器选择的是带有 Simulink 软件的实时仿真机主机，运行的是利用 Simulink 搭建的智能变电站仿真模型，模拟的是变电站一次电气设备在正常工作情况或出现故障时候的运行状态，即虚实结合部分中的虚拟对象。实际控制器部分采用的是实际的继电保护装置，继电保护装置可通过接收仿真模型发来的信号与虚拟对象进行互动。

2.2 Simulink 与实时仿真机

Matlab 软件是一款具有强大的科学计算机数据处理能力的数学类科技应用软件，凭着友好的编程环境被广泛应用于工程计算、信号检测、信号处理等领域，同时还具备强大的图形处理能力，也常常被应用于图像处理以及金融建模方面，深受广大学者的喜爱。

Simulink 是 Matlab 的一个重要组件，它是目前被广泛应用的可视化仿真工具之一，为人们提供了非常方便的框图设计环境，主要用于动态系统的设计和建模，同时可以对仿真模型的运行结果进行综合分析。Simulink 非常友好且功能强大，操作界面简洁易懂，可支持线性系统和非线性系统的仿真，还可设置连续采样时间、离散采样时间或者两种混合的采样时间等，非常符合智能变电站模型界面搭建的要求。Simulink 还可借助 Matlab 的计算功能和仿真工具展开计算和仿真，具有十分丰富的可扩充预定义模块库，在打开仿真平台后，仅用鼠标选择并拖动就可以进行目标模型框图的绘制，利用交互式的图形编辑器可以非常直观地管理模块图。



图 2.2 实时仿真机主机

实时仿真平台集成了 Matlab 实时操作系统，运行在 Intel 的 CPU 上，具有模型搭建和仿真管理的功能，凭借着出色的实时性能，在 Simulink 中设计好的模型不仅可以单独进行非实时的仿真，也可以结合实际的系统进行实时仿真。本论文中继电保护装置的信号收发情况为每 250us 进行一次，且时间误差要求小于 1us，仅由 Simulink 仿真软件无法实现数据长时间实时交互，实时仿真机的模型实时仿真步长在 10us 到 50us 之间，完全胜任本论文中的仿真工作。通过实时仿真机和 Simulink 的结合，不仅搭建了智能变电站模型界面，还实现了仿真模型与真实设备间的数据的实时传输，为整个软硬件结合的实时仿真系统奠定了基础。

2.3 IEC61850 与协议转换器

智能变电站由许许多多的智能电子设备组成，智能电子设备简称 IED(Intelligent Electronic Device),它们通过网络通信互联可以实现远程控制和检测的功能，但前提是它们要有一套共同的通信标准。国际电工委第 57 届技术委员会制定了 IEC61850 通讯协议，为了更好地实现互操作，采用了面向对象的思想，致力于使智能变电站内来自不同厂商的智能电子设备能够互联互通，有效促进了电力行业的调度协调、信息共享和功能交互等方面的发展，也解决了本论文中电子设备无法正常交互的问题。

来自实时仿真主机的信号不满足智能变电站的通信标准，导致了实际的继电保护装置不能识别，因此需要协议转换器辅助将收发的信息转换成满足 IEC61850 通信标准的

信号再进行传输。即通过网线接收实时仿真机处理好的信息，在协议转换器内部完成通讯规约的转换，再通过光纤将数据送到继电保护装置，同时将同样的数据通过交换机转换后传输到负责报文分析的计算机。

2.4 继电保护装置

在搭建智能变电站仿真模型的过程中主要结合继电保护进行设计，继电保护是当电力系统出现故障的时候能够及时发出告警或者直接动作切除故障的一种措施，继电保护装置就是这种措施的执行者，主要通过测量比较元件、逻辑判断元件和执行输出元件的相互作用完成保护动作。继电保护装置根据测量到电气量的异常变化工作，具体的流程则是通过互感器将被保护设备中的电气量进行采样传递给继电器，作为比较元件，电流继电器先将收到的值与给定值进行比较，当收到的值小于给定值，不动作，但如果收到的信号大于给定值则向中间继电器或者时间继电器发送信息，使断路器跳开。继电保护装置可以对电力系统的运行状态进行监视和远程操作，减少了故障对电力系统元件的伤害。

本论文涉及的电流差动保护采用的数字化继电保护装置主要是许继集团的WXH-813 高压线路保护装置，作为智能变电站仿真模型中 110kV 输电线路的主保护，可以通过设定功能选项来选择投入或退出运行保护类型。在智能变电站仿真模型中以电流差动保护为例，设计故障进行实验，所以继电保护装置要相应地投入运行纵联差动保护，退出其他保护。电流差动保护根据基尔霍夫原理工作，流入和流出电流互感器的电流矢量差为差动电流，当差动电流为较小甚至为零，即差动电流未达到继电保护装置整定值的时候，设备正常工作，保护不动作；反之，若差动电流达到保护装置的整定值时，保护动作，发出告警。

3 智能变电站模型的搭建与保护装置的配置

本论文的核心目的是实现对智能变电站 HIL 仿真系统的测试，主要工作分为两个阶段。第一阶段工作是搭建智能变电站模型和配置继电保护装置，将在本论文第三章进行论述。

第二阶段工作是运行仿真系统进行测试，分为三个部分：第一部分是运行仿真系统，分析仿真主机和同步实时协议转换器发出来的信号，检验仿真系统内容设置的正确性；第二部分通过分析继电保护装置内数据的幅值和角度以及告警信息来检验仿真系统的实时性和同步性；第三部分是通过设计线路差动故障，观察智能变电站模型中的波形变化以及继电保护装置的动作情况来检验仿真系统的故障仿真功能，将在本论文第四章进行介绍。

3.1 电气接线图

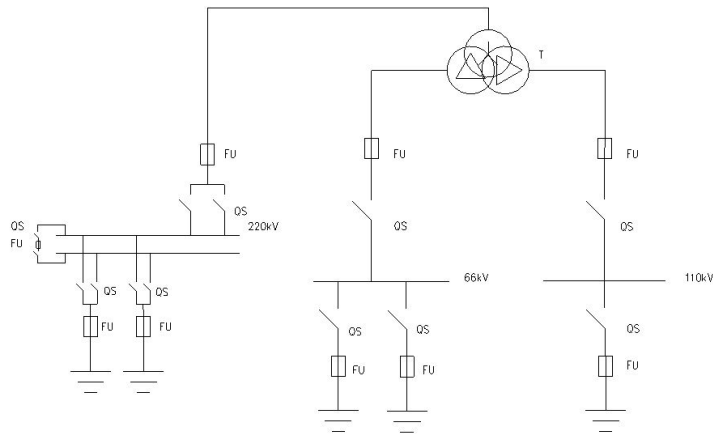


图 3.1 一次回路接线图

图 3.1 表示的是本论文中智能变电站仿真模型的一次回路接线图，以三相三绕组变压器为核心，设置了三个电压等级，包含若干个间隔以及常规变压器会涉及到的保护。

3.2 智能变电站仿真模型搭建

变压器是电力系统的核心组成部分，对变压器进行继电保护试验具有重要意义，下图为本论文的 Simulink 仿真智能变电站模型，其中上半部分为数据采集和数据比较模块，下半部分为智能变电站仿真模型界面。

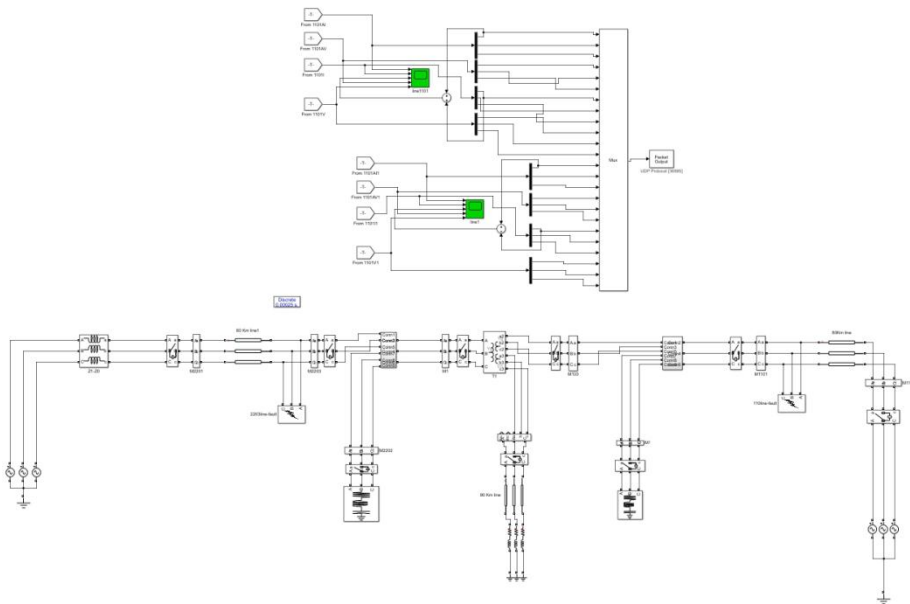


图 3.2 智能变电站仿真模型

该模型主要以三相变压器为核心，分别连接三组长线路设置负载，在 220kV 线路和 110kV 线路分别设置单相短路故障和三相短路故障，在线路的两端设置测量点和断路器，并设置示波器以观察两端电流变化。在模型上方设计了数据采集、差流计算、示波器显示以及数据打包外送，将分别来自 220kV 线路两端和 110kV 线路两端的测量到的电压电流汇入差流计算模块，通过模块进行计算，最终将输出结果显示在示波器中，同时来自 220kV 线路两端和 110kV 线路两端的电流和电压也会和求差结果一起被送入示波器中，也就是说每个示波器模块将包含五组数据、显示五组波形，五组波形从上至下、从左至右分别是两组电流、电流差、两组电压，在验证部分再有详细的说明。

3.2.1 交流电源模块

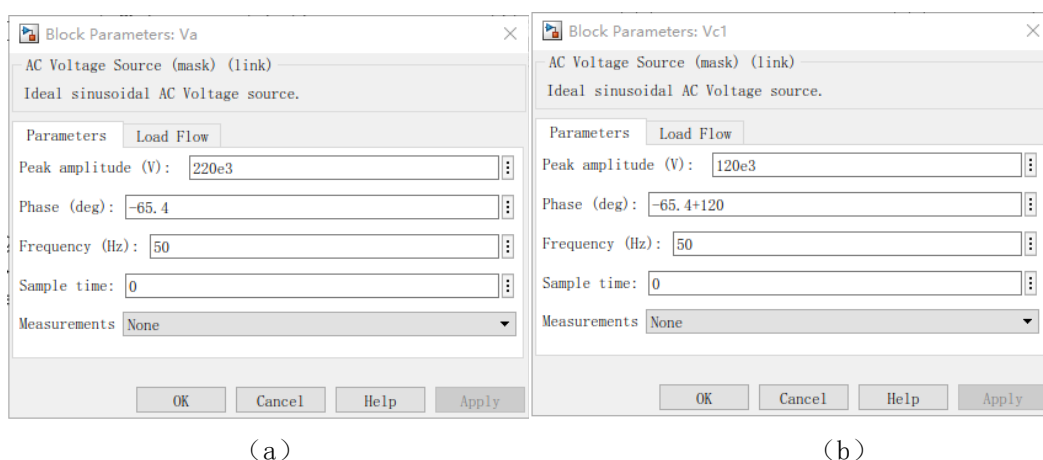


图 3.3 交流电源模块

本模型为双电源电路，分别由 220kV 线路和 110kV 线路向中间的三相变压器供电，三相交流电源的运行特性直接影响电力系统的运行状态，因此三相交流电源模块的参数或者其他模块的参数都要按照实验需求进行设置。这里以交流电源模块为例子，介绍模块选择路径，打开“simulink library Browser”库浏览器，点击“simscape”物理模型仿真模块组，在里面找到“power systems”电力系统模块，打开并选择“Specialized Technology”，找到“Fundamental Blocks”基本结构模块中的“Electrical Sources”电源模块，最后将“AC Voltage Source”交流电压模块拖到模型中即可。然后对电源模块进行配置，选中交流电源模块双击打开，在 Parameters 参量页面按要求依次填好 Peak amplitude（电压峰值）、Phase（相角）、Frequency（频率）、Sample time（采样时间）、Measurements（测量）；在 Load Flow（潮流）里面选择 swing。

3.2.2 三相断路器模块

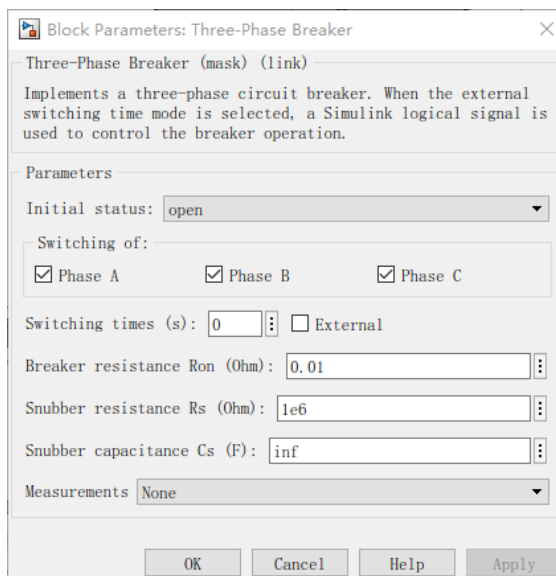


图 3.4 三相断路器模块

作为继电保护的执行元件，在模型中三相断路器模块主要和三相电压电流测量模块结合使用，起到为继电保护装置提供数据和根据要求动作的作用，是否动作受线路两端的电流差影响。在本模型中多处都用到了这两个模块，参数设置大致相同，仅修改相关名称即可。三相断路器的参数设置如图 3.4，这里只有 Parameters(参量)一个页面，打开 Initial status(初始状态)，把 A、B、C 三相都勾起来，然后切换时间为 0，Breaker resistance Ron（断路器电阻）设为 0.01(Ohm)，Snubber capacitance Cs（缓冲电容）填 inf，Measurement 选择 None。当 220kV 线路两端和 110kV 线路两端的电流差达到设定的值断路器就会动作，在实际的继电保护设备中“跳闸”显示灯亮起。

3.2.3 三相电压电流测量模块

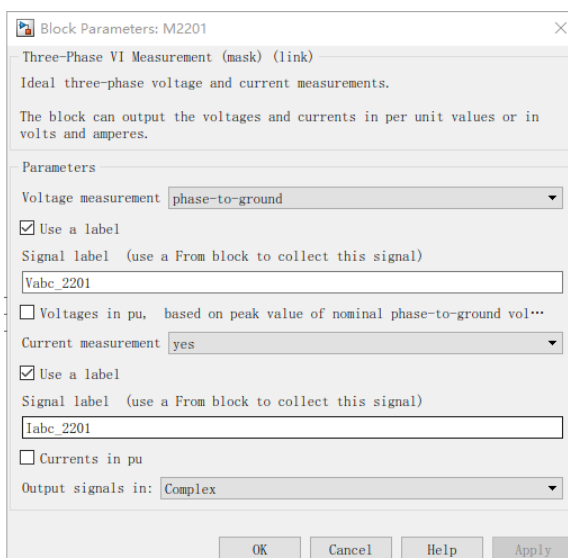
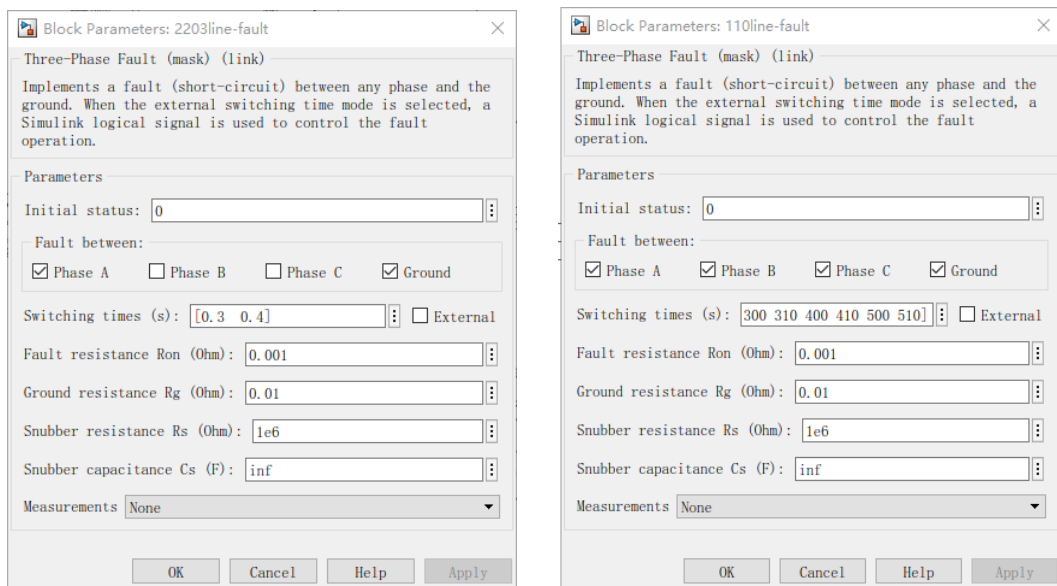


图 3.5 三相电压电流测量模块

三相电压电流测量模块除了上述作用以外，还为本模型设计的纵联差动保护提供数据，主要通过测量线路两端的电流和电压，将数据采样到图 3.2 上方的差流计算模块中进行差流计算以判断继电保护是否动作。其参数设置如上图所示，主要修改 Signal label（信号标签）来设定和区分测量点，220kV 线路两端设定为 Vabc_2201、Iabc_2201、Vabc_2202、Iabc_2202, 同理，110kV 线路两端设定为 Vabc_1101、Iabc_1101、Vabc_1102、Iabc_1102，以此类推。

3.2.4 三相故障模块



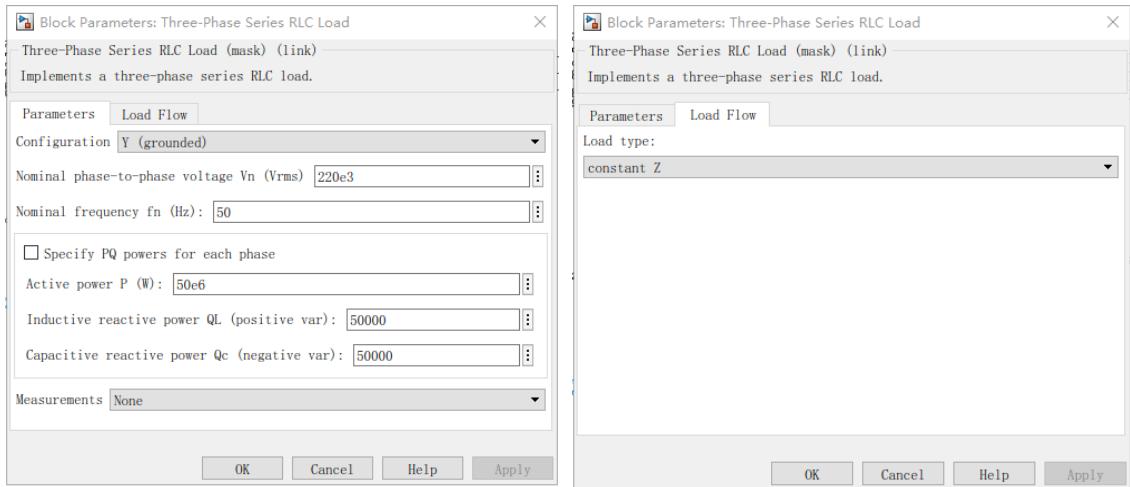
(a)

(b)

图 3.6 三相故障模块

本论文主要以纵联差动保护为例，在 220kV 线路设计单相接地短路以及在 110kV 线路设计三相短路故障来验证，Initial status(初始状态)设置为 0，表示断开。图 3.6 (a) 表示的是 220kV 线路侧的单相接地短路故障，在 Fault between 下方勾选 Phase A 和 Ground 构成单相接地故障，(b) 则表示的是 110kV 线路侧三相短路故障，将 Fault between 下方三相和地全部勾选可设置成三相短路故障。在 switching time 中设置出现脉冲的时间，即相当于故障出现时间，在 110kV 线路设置了多次逻辑脉冲以方便对比观察，规律为每 100 秒出现故障，持续 10 秒，若在实际继电保护装置中将出现跳闸现象，在摁了复归之后，循环将会继续，每 100 秒跳闸一次，否则将会保持闭锁。

3.2.5 三相 RLC 负载模块



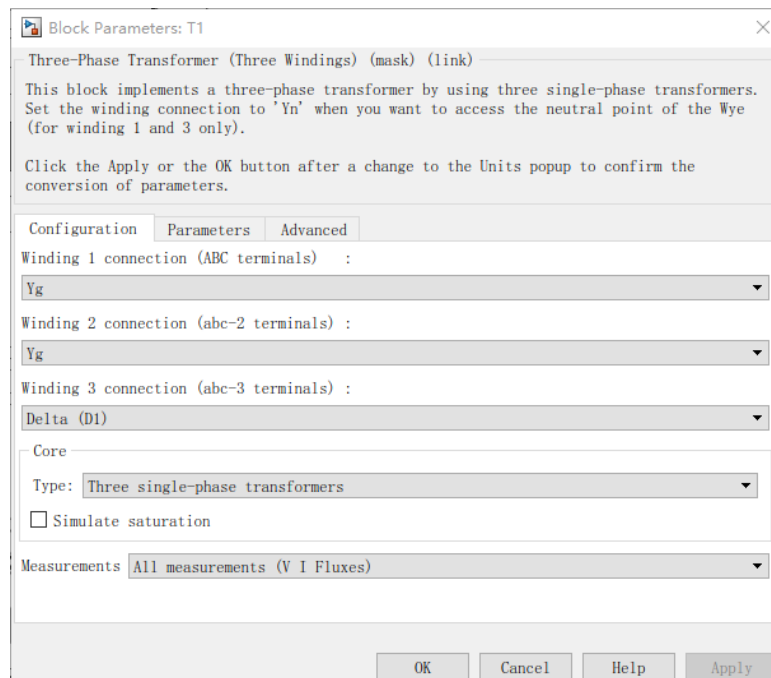
(a)

(b)

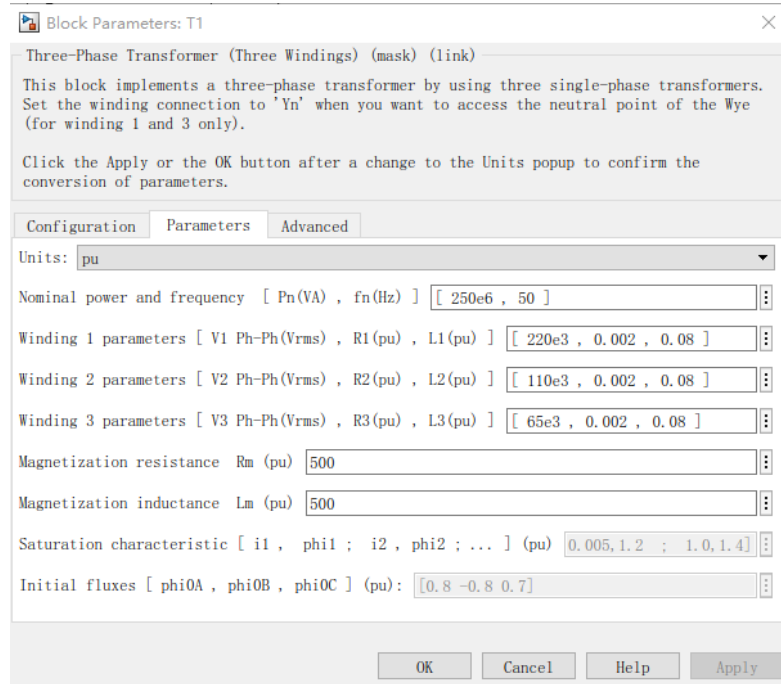
图 3.7 三相负载模块

在本论文中三相负荷模块充当的是用电用户的角色，其相关设置如图 3.7 所示，首先 Configuration（构造）选择 Y(ground)中性点直接接地的连接方式，再设置电压值、频率值等，在 Load Flow 页面选择 constant Z。

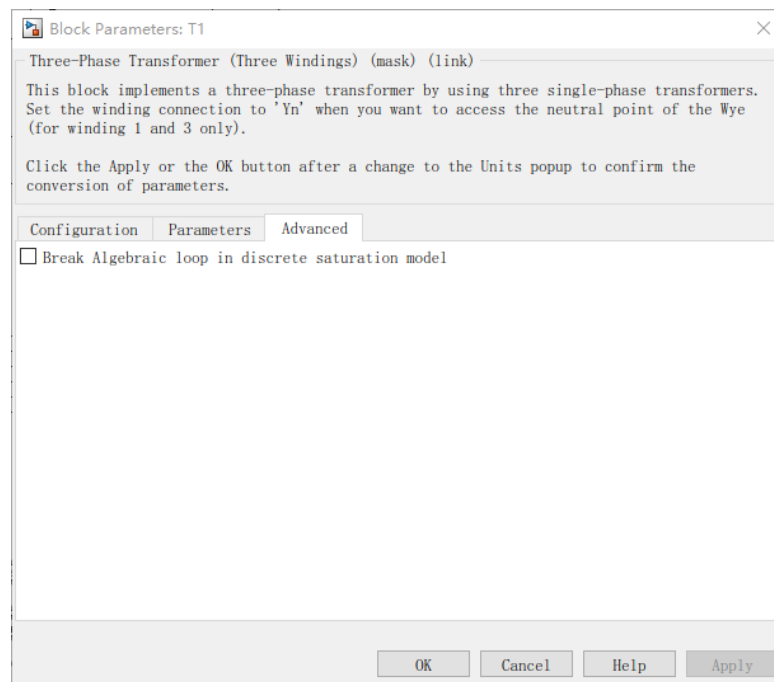
3.2.6 三相变压器（三绕组）模块



(a)



(b)

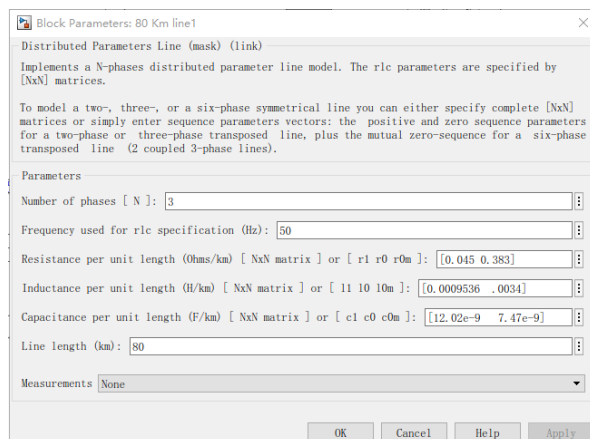


(c)

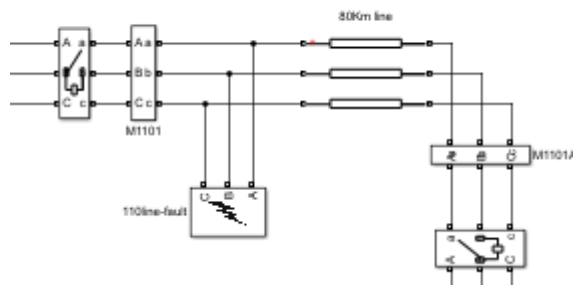
图 3.8 三相变压器（三绕组）模块

三相变压器是智能变电站的核心设备，本论文选择了三相三绕组的变压器模块模拟三条支路，分别是 220kV、110kV 和 66kV 线路，象征着来自不同电压等级的用电用户，在配置页面选择了星形接地的形式(Yg)，类型选 three sing-phase transformers（三个单相变压器），然后在参数配置页面按要求填入即可，Advanced 页面不勾选。

3.2.7 线路模块



(a)



(b)

图 3.9 线路模块

本论文由三条支路汇入变压器，其中包括两条 80km 的线路以及一条 90km 的线路，于是选择线路模块对真实的输电线路进行模拟，其相关数据的设置如图 3.9(a)所示，在想要改变线路长度的时候修改 Line length 选项即可，单位为千米。线路两端分别设置了三相电压电流测量模块和三相断路器模块对线路进行保护，故障模块放在线路一端设置故障，如图 3.9(b)所示。

3.3 继电保护装置配置

本论文在实际继电保护装置用的是 WXH-813 高压线路保护装置和 WXH-803 高压线路保护装置，两套设备适用于不同的电压等级，这里分别对应的是 110kV 线路保护和 220kV 线路保护，为了更好地理解设备的工作原理，本文将以 110kV 线路的线路保护装置为例进行介绍。其中 WXH-813 高压线路保护装置的前三个字母是硬件平台代码，这里的 WXH 指的是微机线路保护，后面跟着的 813 指的是保护系列代码。该设备支持直跳、直采的接口方式，模拟量采用 IEC61850-9-2 点对点接入，开关量采用 GOOSE 接入，还可进行状态检修和状态监测。

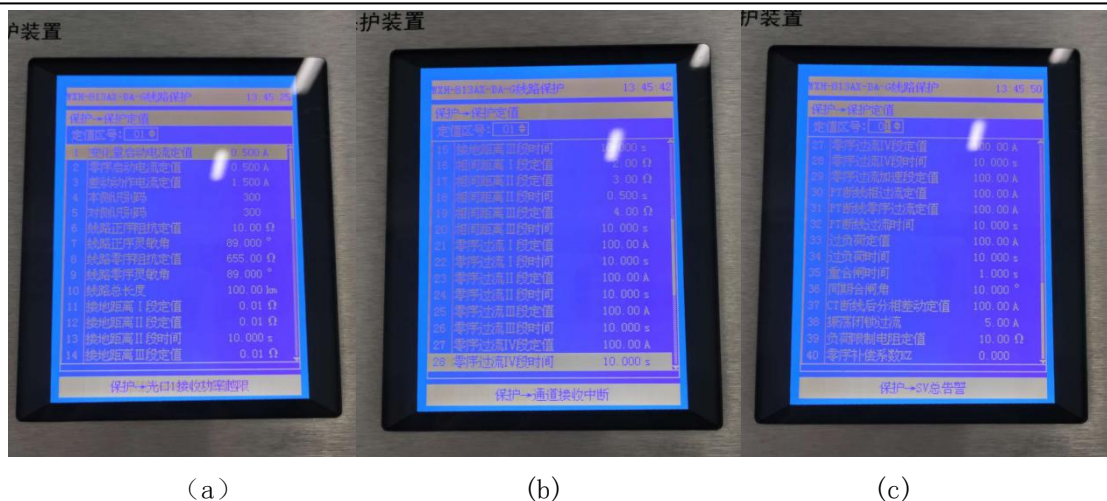


图 3.10 线路保护装置参数设置

首先要将保护装置中的保护定值在规定的二次值范围内按要求设定好，包括变化量启动电流定值、零序启动电流定值、差动动作电流定值、本侧识别码和对侧识别码、线路正序和零序阻抗定值、线路正序和零序灵敏角、线路总长度等 40 项内容。其中为了方便调试单侧的继电保护装置，可以将本侧、对侧识别码设为相同的号码，将光纤两端都接入本机的 TX 和 RX 接口即可实现自环测试实验；若实现线路两端的互通则需要将本侧、对侧识别码分别给两台设备对应设定，连接光纤时将本侧的 TX 和对侧的 RX 相接、将本侧的 RX 与对侧的 TX 相接。

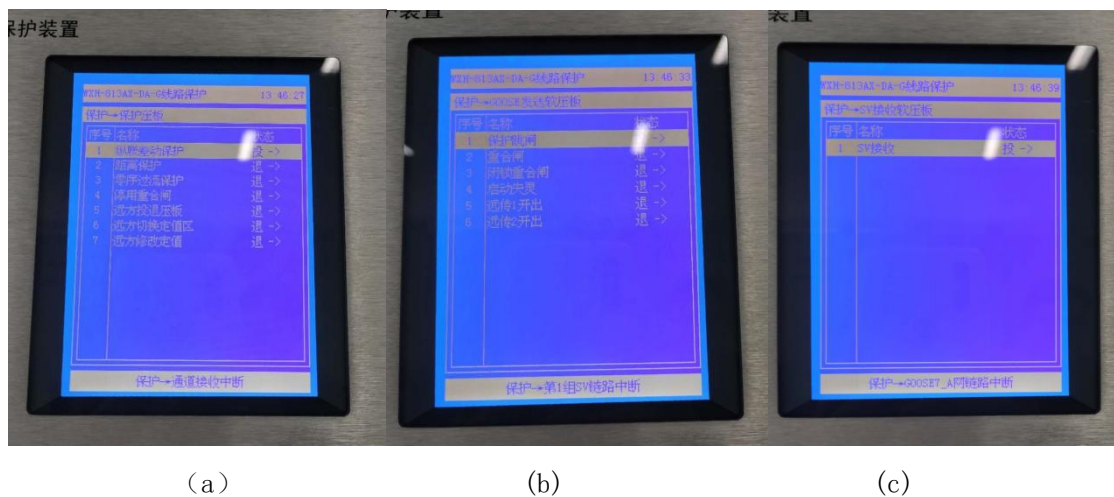


图 3.11 保护压板及软压板设置

图 3.11 中(a)图显示的是保护压板的设定，也就是对设备要求的保护功能进行选择，这里选择纵联差动保护，即设为“投入”的状态，其他保护暂时不用便将其退出运行状态。同样，在 GOOSE 发送软压板菜单里面，由于本论文的智能变电站模型中仅使用了断路器跳合闸保护的方式，所以在图(b)中投入运行“保护跳闸”

即可。本装置主要通过 SV 采集电流、电压等采样数据，在图(c)中需要将“SV 接收”软压板设为“投”，SV 测量投入运行。



图 3.12 一二次值设置

一二次值的设置对整个继电保护装置和最终结果的验证都有着关键的影响，其中“一次值”指的是真实的电网数据值，在这里相当于 Simulink 中测量到的数据值的“峰值”，可通过示波器(Scope)来查看；“二次值”指的是通过比值之后数值的“有效值”，当设备正常接通后将会显示在液晶显示屏的实时数据页面中，在本论文中一二次值的比值设定为 6: 1。

3.4 设备的互联互通

本论文的主要桥梁是协议转换器，主要通过它将 Simulink 中的智能变电站仿真模型的数据转换为与真实智能变电站中相同的信号再传递给继电保护装置（这里是高压线路保护装置），实现了信息开放开源，是智能变电站硬件在环实验的基础，设备之间的连接如图 3.13 所示。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/445031334102011132>