

东南大学-协同育人项目

《智能电网综合自动化虚拟仿真实验》

变压器差动保护实验

实验指南

陈歆技

(2021年11月5日起草)

东南大学电气工程学院

一、实验目的

1. 理解和掌握智能电网变电站综合自动化虚拟仿真实验系统的结构与原理；
2. 熟悉和掌握变压器差动保护装置定值配置方法、模拟电网故障设置及继电保护实验的操作方法；
3. 通过变压器的短路故障实验，记录和观察故障电压、电流波形、实验现象及实验数据，理解电力变压器故障过程及变压器差动继电保护工作原理；
4. 通过变压器区内与区外的短路故障实验，理解和掌握变压器差动保护装置动作特性，学会变压器差动保护装置定值整定计算方法；
5. 通过变压器故障电压、电流波形分析及保护装置动作行为的分析，理解和掌握短路类型及保护定值对变压器差动保护功能的影响。

二、实验原理

智能电网综合自动化虚拟仿真实验的基本原理是：以虚拟智能变电站所装设的继电保护与自动装置原理为基础，先根据模拟典型电网主接线，利用仿真计算软件工具构建模拟电网计算模型，并实时进行正常运行及故障情况下电压、电流及装置行为的仿真模拟计算，以模拟电网运行过程中的各种故障现象及继电保护与自动装置的行为，通过继电保护与自动装置的动作情况，理解继电保护与自动装置的原理。

(1) 实验模拟电网运行环境

为了使实验能够体现电力系统的完整概念，本实验项目将 220kV 变电站主接线作为典型电网的一部分，其运行环境及实时运行参数与模拟电网一致。其模拟主接线如图 1 所示。

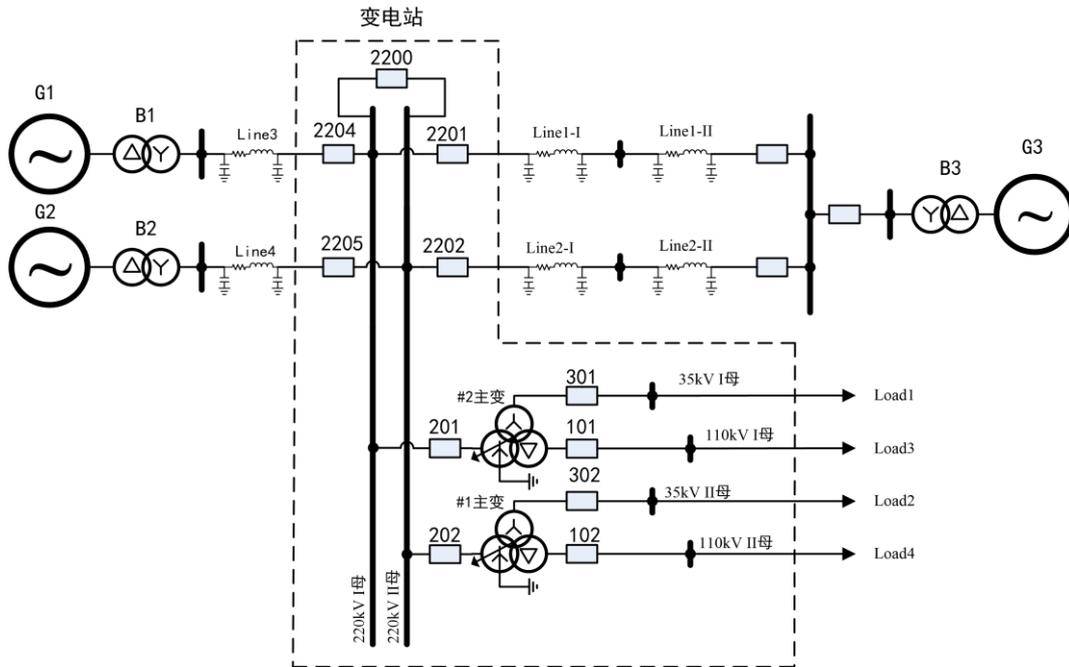


图 1 变电站主接线与模拟电网关系图

针对变压器差动保护实验，其简化后的一次主接线如图 2 所示。

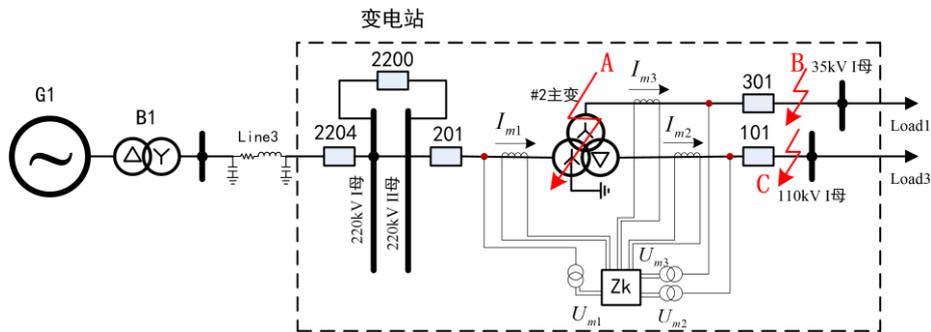


图 2 变压器差动保护一次主接线图

图 2 中，Zk 为所装设的 PST 1200U 变压器保护装置，其电压与电流输入量均来自#2 主变高、中、低压侧母线与各侧断路器之间所装设的电压互感器 EPT 与电流互感器 ECT 的测量量，电力系统继电保护原理相关理论及 PST 1200U 变压器保护装置原理，可知 PST 1200U 变压器差动保护主要由各侧电流之和的差动元件构成。其差动特性为稳态差动比率特性。

针对变压器差动保护实验，假设变压器装设差动保护装置，区内及区外不同点上的故障，保护装置出口接有变压器三侧出口断路器模拟装置，用于模拟断路器 101、201、301 的行为；实验对象为该#2 主变对应的保护装置，其差动特性为稳态比率差动制动特性曲线，通过在不同故障点分别设置不同的故障，进行模拟实验，观察变压器出口断路器、虚拟继电保护装置、监控系统的状态，理解保护装置的基本工作原理。

(2) 实验对象的特性

本项目的实验对象为变压器继电保护装置，该装置的差动特性为稳态差动比率特性，其特性曲线如图 4 所示。

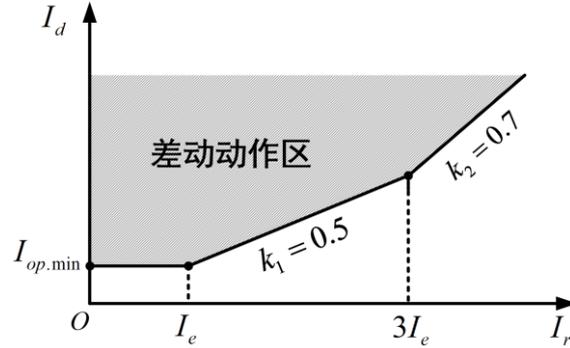


图 4 保护装置的稳态差动比率特性曲线

当保护装置测量的短路位于阴影区时，则保护装置动作，切除故障，否则不会动作。

(3) 保护装置定值计算原理

要实现保护装置的**速动性、选择性、灵敏性、可靠性**的要求，根据继电保护基本理论，必须根据继电保护原理进行定值计算与整定。

根据被变压器差动保护的基本参数，继电保护装置差动保护定值可由如下方法计算：

其差动保护的动方程：

$$\begin{cases} I_{dz} \geq I_{dz0} & I_{zd} \leq I_{zd0} \\ I_{dz} \geq K_{z1} [I_{zd} - I_{zd0}] + I_{dz0} & I_{zd0} < I_{zd} \leq I_{zd1} \\ I_{dz} \geq I_{dz0} + K_{z1} [I_{zd1} - I_{zd0}] + K_{z2} [I_{zd} - I_{zd1}] & I_{zd} > I_{zd1} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中： I_{dz} 为差动电流，是各侧电流的相量和， I_{zd} 为制动电流；差动方程为三折线式的方程，由三条直线方程组成，以 I_{zd} 的取值范围来划分，第一段直线的斜率通常取 0（水平直线）或 0.2（ $I_{zd} \leq I_{zd0}$ ），第二段直线的斜率为 K_{z1} ，称为差动比例系数，是一个可变的定值（ $I_{zd1} < I_{zd} \leq I_{zd0}$ ），第三段直线的斜率为 K_{z2} （ $I_{zd} > I_{zd1}$ ）。

(4) 保护装置的差动保护定值整定原则：

- 1) 三段式比率制动特性中，电流启动值是针对躲开正常运行时的不平衡电流而设定的，因此，其应当按照躲开最大负荷情况下的不平衡电流进行取值，通常取 $I_{zd} = (0.2 \sim 0.5)I_N$ 。

- 2) 使用三段式比率差动的特点就是反映了故障时的实际情况, 在较小的外部故障的情况下, $I_{zd} = (2 \sim 3)I_N$, 电流互感器饱和程度不深, 误差还是较小的, 这时允许选取较小的制动系数 ($K_{z1} = 0.2 \sim 0.5$), 这样相应地增加了动作区, 在区内故障时提高了灵敏度, 本实验取 $K_{z1} = 0.2$ 。
- 3) 在较严重的外部故障的情况下, 可以选择较大的制动系数 ($K_{z1} = 0.75$), 这时电流互感器流过了很大的穿越性故障电流, 互感器饱和程度加深, 误差也随之增大, 应当选择较大的制动系数, 同时, 在这种区内短路故障的情况下, 差动电流远远大于制动电流, 可以保证保护装置在区内故障时可靠动作, 本实验取 $K_{z1} = 0.75$ 。

(5) 实验基本参数

智能电网综合自动化实验系统中所涉及的主要参数包括变压器、定值参数及控制字等参数, 主要参数如下:

表 1 模拟电网变压器元件参数表

变压器名称	变压器容量 (MVA)	额定电压 (kV)			额定电流 (A)		
		高压侧	中压侧	低压侧	高压侧	中压侧	低压侧
#1 主变	120.0	220.0	121.0	35.0	600.0	1200.0	2000.0
#2 主变	120.0	220.0	121.0	35.0	600.0	1200.0	2000.0

表 2 变压器差动保护定值表

序号	整定值名称	简称	整定值	MAX	MIN	单位
00	纵差差动速断电流定值	SDDZ		20.000	0.050	实数
01	纵差保护启动电流定值	CDDZ		5.000	0.050	实数
02	二次谐波制动系数	K2DZ	0.150	0.300	0.050	实数

表 3 变压器差动保护控制字表

序号	整定值名称	简称	整定值	MAX	MIN	单位
00	纵差差动速断	CSK	1:1-投入	1	0	控制字
01	纵差差动保护	ZCK	1:1-投入	1	0	控制字
02	二次谐波制动	K2K	1:1-投入	1	0	控制字
03	CT 断线闭锁差动保护	CTBK	1:1-投入	1	0	控制字

三、实验内容

实验的主要内容包括两部分：**【基础实验】**和**【综合实验】**。

(1) **【基础实验】**的主要内容：

1. 变压器区内故障差动保护动作验证

该实验项目测试变压器区内故障时差动保护动作情况，获取故障录波波形图，并校验定值的正确性。

2. 变压器区外故障差动保护动作验证

该实验项目测试变压器区外故障时差动保护动作情况，获取故障录波波形图，并校验定值的正确性。

(2) **【综合实验】**的主要内容：

对于**【综合实验】**部分，可以根据系统基础运行参数计算保护定值，参照**【基础实验】**的项目进行实验步骤设计，可灵活设定实验故障测试参数，以达到测试保护装置动作特性的目的，最终通过故障实验测试验证所设保护定值的正确性。

四、实验操作与步骤

(1) 实验操作的主要场景

实验操作的场景主要有三个，分别是监控中心控制室场景、继电保护控制屏场景及断路器控制屏场景。

A. 监控中心控制室场景的控制台布置有**监控系统主站、实验测试控制主机**及监控系统其他客户端，监控系统主站用于智能变电站系统运行状态监控及运行参数的远方设置，实验测试控制主机用于实验故障测试中相关参数的设置与故障实验控制；

B. 继电保护控制屏场景中与实验相关的主要是**线路保护装置**，学生可通过装置的人机交互 LCD 界面进行装置参数设置、信号复归等操作；

C. 断路器控制屏场景包括与实验相关的**输电线路出线断路器的控制屏**，学生可通过控制屏上的控制开关及指示灯观察保护装置动作出口情况，并可操作断路器分合闸。

(2) 交互性实验操作步骤

实验过程中，**操作步骤**分为三个部分，共 11 个步骤，操作步骤如下：

步骤1. 智能电网综合自动化虚拟仿真实验系统登陆

在浏览器（建议用 chrome 浏览器）上输入网址（虚拟仿真实验主页地址），进入实验课程主页，点击【登陆】进行 WEB 页面登陆。

在实验课程 WEB 主页面中，拥有【实验简介】、【实验要求】、【成绩判定】、【教学团队】、【在线讨论】等菜单栏，点击相关菜单栏进入相关页面进行查看和学习。

A. 【实验简介】页面对实验的总体情况进行介绍，使实验者了解实验环境、实验主要内容等；

B. 【实验要求】页面详细说明实验的基本要求及注意事项；

C. 【成绩判定】页面对学生的实验成果进行评分统计与评价；

D. 【教学团队】页面介绍教学团队成员情况；

E. 【在线讨论】页面提供了教师与学生的交流互动界面，用于实验过程中对相关技术问题的讨论。

点击【进入实验】按钮进入实验操作界面。

步骤2. 熟悉虚拟实验环境与虚拟实验设备基本操作

在实验操作界面中，右侧是实验模块选择菜单，包括【实验操作引导学习】、【变压器故障基础实验】及【变压器故障综合实验】等。

(1) 【实验操作引导学习】

A. 学生通过引导模块中【实验操作场景浏览】来熟悉智能电网综合自动化虚拟仿真实验教学系统的实验环境，了解虚拟场景中主要设备的位置；

B. 熟悉实验场景后，点击【基础实验】菜单可进入基础实验环节引导学习部分进行实验操作练习。

(2) 【变压器故障基础实验】

A. 在【变压器故障基础实验】中，通过【实验设备运行状态检查与参数设置】环节对实验故障测试之前的设备状态进行检查，并按照设置定值参数；

B. 定值参数设置完成后，点击【实验故障参数设置与实验测试】菜单可进行基础实验部分的故障实验测试。

(3) 【变压器故障综合实验】

A. 在【变压器故障综合实验】中，通过【实验基础参数浏览】菜单查看综合设计的基础参数，并计算相关装置定值参数；

B. 定值参数计算与设置完成后，点击【装置参数设置与实验测试】菜单可进

行综合设计实验部分的相关实验操作与测试。

主要的虚拟现实场景：

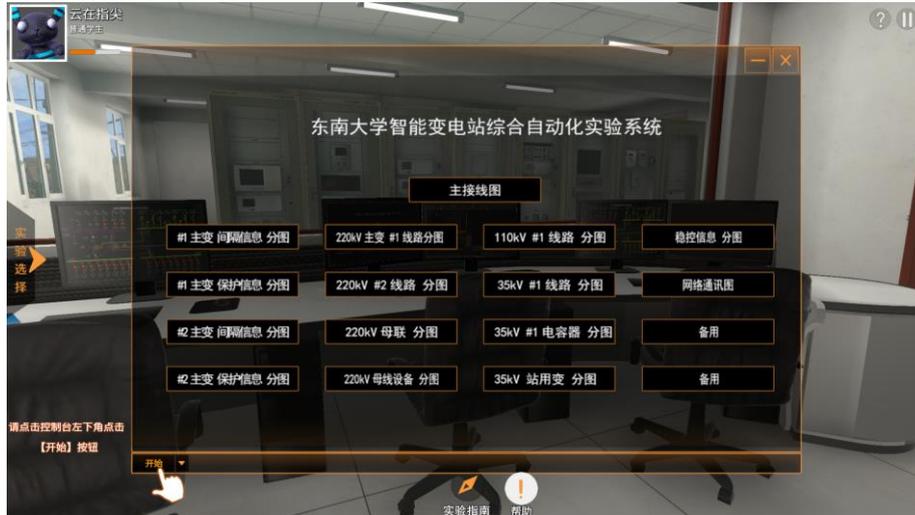


图 5 虚拟智能变电站监控中心控制室场景图

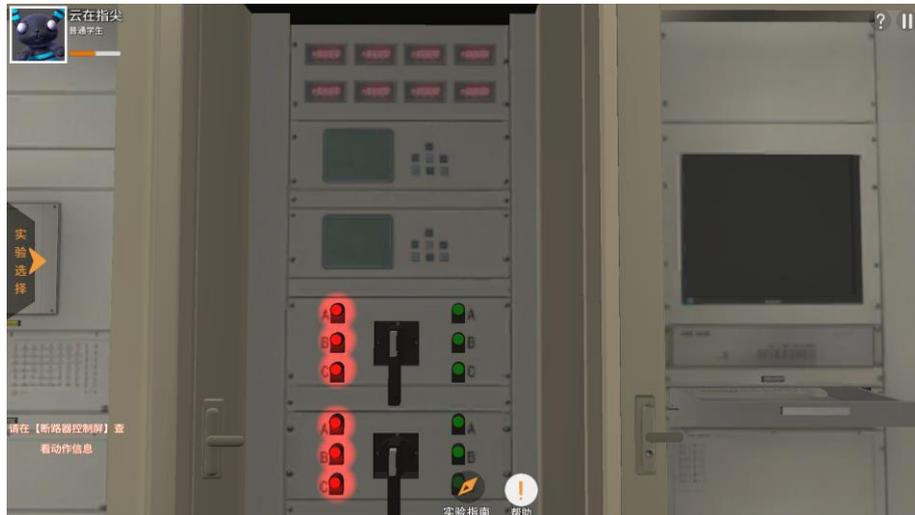


图 6 虚拟变电站内断路器控制屏场景图



图 7 虚拟智能变电站继电保护控制屏场景图

步骤3. 虚拟继电保护装置定值的整定

根据继电保护装置原理，要进行继电保护装置的实验与保护动作验证，必须根据需要对装置保护定值进行整定（即定值设置），有两种方法可以进行保护装置定值参数查看与修改，分别是监控主站**远方**定值查看与修改和保护装置参数与定值**本地**查看与修改，两个方法修改结果是一样的，分别在【监控中心控制室】和【继电保护控制屏】两个场景中进行，对于保护装置定值来说只需要选择一个场景进行修改即可，其修改的对象都是保护装置中存储的定值。保护装置的系统运行参数（例如互感器变比等参数）则需要在保护装置本地修改。

(1) 监控主站**远方**定值查看与修改

监控主站**远方**定值查看与修改是采用虚拟智能变电站【监控中心控制室】场景的监控系统主站的自动化监控系统软件系统进行保护装置定值的远方查看与修改。点击【监控中心控制室】场景中的【监控系统主站】控制台终端显示器进入监控主站主界面如图 8 所示。

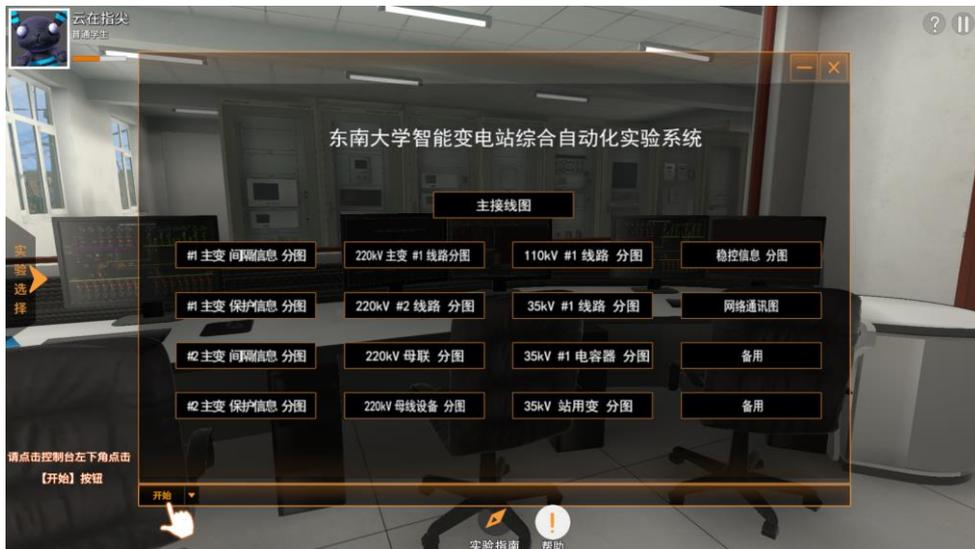


图 8 虚拟自动化监控系统监控主站界面图

在【监控中心控制室】场景的【监控系统主站】主界面中，系统菜单是以类似于 Windows 操作系统中的“开始”图形菜单界面的形式呈现的；在监控系统主站的控制台终端界面左下角点击【开始】【应用功能】【保护管理】菜单，即可打开“设备管理进程”界面，如图 9 所示。



图9 虚拟设备管理进程界面图

在虚拟“设备管理进程”界面中，展开窗口左侧的“工程对象库”，找到“#2主变保护(PST1200U)”中的“保护LD”，在窗口右侧的“定值”选项卡中，选择正确的定值“区号”（默认区号为“0”，应该选择“1”），点击“上装”按钮，可以查看和修改保护装置定值。需要注意的是当前运行定值区号必须正确设置，这可以通过在“区号”选项卡中上装当前定值区号进行确认。

需要设定的定值参数如下：

- 1、变压器纵差纵差差动速断电流定值；
- 2、变压器纵差差动启动电流二次谐波制动系数定值；
- 3、变压器纵差二次谐波制动系数定值；

设置完成后，需要将保护定值进行【下装】，点击【下装】按钮，在弹出的【权限验证】对话框中，选择【系统管理员】，输入密码后点击【确定】按钮（默认密码999），如图10所示，即可将定值写入保护装置。



图10 保护装置定值下装权限验证界面图

随后，点击【上装】按钮，对修改后的定值进行更新。

(2) 保护装置定值参数本地查看与修改

保护装置定值参数本地查看与修改与远方定值查看与修改类似，只是修改的场景不同，即直接在保护装置上修改定值。方法是：在【继电保护控制屏】场景中，找到 PSL1200U 保护装置，点击 LCD 触摸屏，弹出如图 11 所示界面，点击 LCD 界面首页的【定值管理】图标（如图 11），在弹出的【定值管理】界面中，首先弹出【参数定值】列表，如图 13 所示。



图 11 虚拟保护装置 LCD 界面图



图 12 保护装置定值管理 LCD 界面图

在【参数定值】界面中，“定值区号”栏中填入正确的定值区号（正确的定值区号为“1”），其他参数选择默认值，点击【读取】按钮，如图 13 所示。此时，保护装置将从存储区中读取数据到界面中。



图 13 保护装置定值读取 LCD 界面图

然后，点击【保护定值】选项卡，即进入保护定值参数界面，如图 14 所示。



图 14 保护装置定值修改 LCD 界面图

在图 14 界面中，使用鼠标点击对应表格中的【值】栏，进行相关定值修改，修改完成后，点击【固化】按钮，弹出【选择固化定值区】对话框，对定值区号进行选择（正确定值区号为“01”），然后点击【确认】按钮，在弹出的密码对话框中输入正确密码（默认密码为 999），如图 15 所示，点击【确认】按钮后，修改后定值会被写入保护装置，并显示【定值固化成功】消息框，如图 16 所示，定值修改操作完成。

【定值查看】的操作与定值修改类似，只是不能够进行参数修改操作。



图 15 保护装置固化定值区界面图

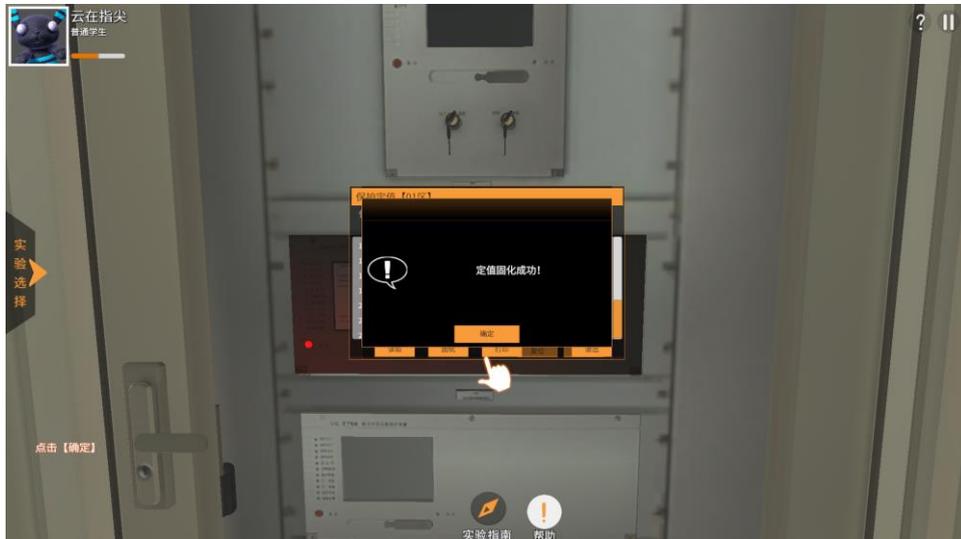


图 16 保护装置定值固化成功消息框界面图

步骤4. 虚拟保护试验测试参数设定

本实验使用虚拟智能变电站【监控中心控制室】场景控制台上的虚拟继电保护实验测试终端进行故障设置。

根据实验需要，对于保护装置距离保护实验，在【监控中心控制室】场景的控制台上点击虚拟【实验测试终端】显示器屏幕，进入实验测试程序界面，如图 17 所示。

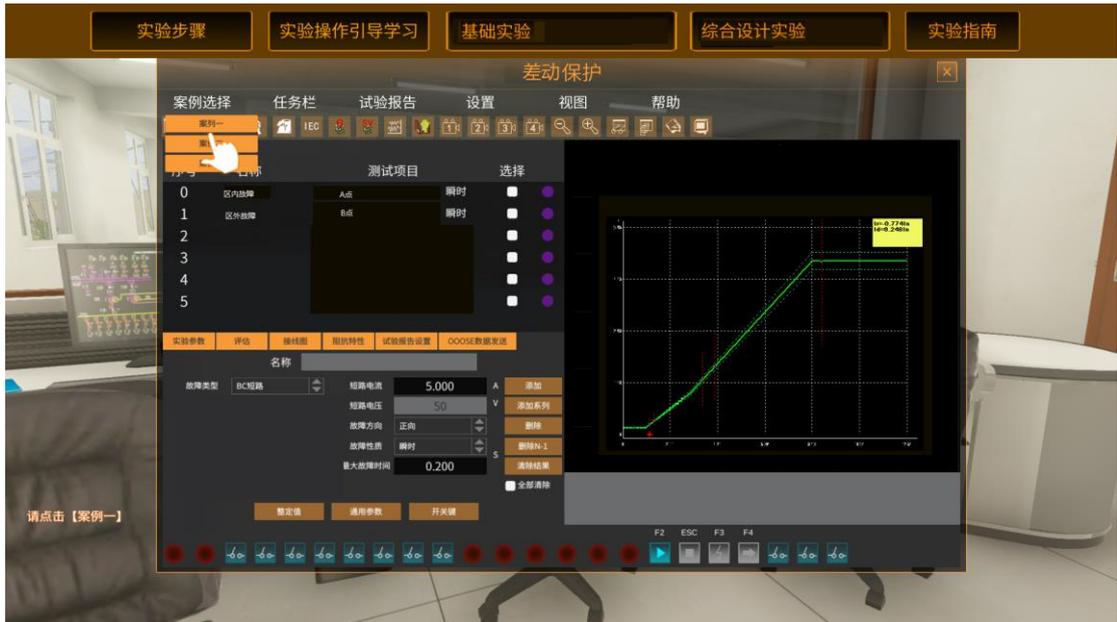


图 17 虚拟差动保护实验测试软件界面图

在实验测试主界面中，点击【案例选择】菜单，选择【案例一】测试项目，在弹出的案例选择对话框中，选择“PST1200U 变压器保护测试.TPL”文件名【打开】按钮，如图 18 所示，将调出已预设的故障测试参数数据。学生可以根据区内保护定值参数值，对预设的实验故障参数进行修改，预设实验测试项目对应于差动保护定值。



图 18 虚拟差动保护实验测试案例文件选择界面图

在综合设计实验部分，故障参数的设置可在图 20 界面的左边栏对应项中进行修改。

步骤5. 虚拟继电保护装置状态检查

实验开始之前，需要检查虚拟继电保护装置的状态；在【继电保护控制屏】

场景中，找到 PSL1200U 保护装置，按压继电保护与自动装置控制屏中对应保护装置面板左侧的“复位”红色按钮，以清除原警告信息及警告指示灯状态，并通过“输入监视”查看 LCD 液晶触摸显示屏中的虚拟保护装置信息。

步骤6. 虚拟继电保护装置出口断路器状态检查与设置

虚拟继电保护装置出口所连接的是虚拟断路器装置（“201”）。在模拟故障发生前，输电线路处于运行状态，保护装置出口断路器应该处于合闸运行状态，在【断路器控制屏】场景中，找到“201”断路器操作手柄及指示灯，如果断路器位置指示灯的绿灯亮起，表示断路器处于“分闸”状态，需要操作“合闸”，扳动断路器操作手柄，操作断路器“合闸”，断路器合位红色指示灯亮起，断路器合闸操作结束。

步骤7. 接地距离 I 段模拟故障实验测试操作

在【继电保护控制屏】及【断路器控制屏】场景中，保护装置及断路器设备状态检查完成后，返回至【监控中心控制室】场景控制台上的【虚拟实验测试终端】主界面，可以开始进行模拟故障试验，如图 19 所示。在图 19 所示界面左上部列表窗口中，将第 1 项“选择”栏中设置为打勾状态，其余选择为未打勾状态，分别按顺序点击保护测试界面窗口中最下边的“运行状态与试验控制”栏中的【F2】，然后在继电保护控制屏的装置面板中点击【复位】按钮，以便将保护装置状态复归，随后返回【虚拟实验测试终端】主界面点击【F3】按钮，启动变压器区内故障试验。

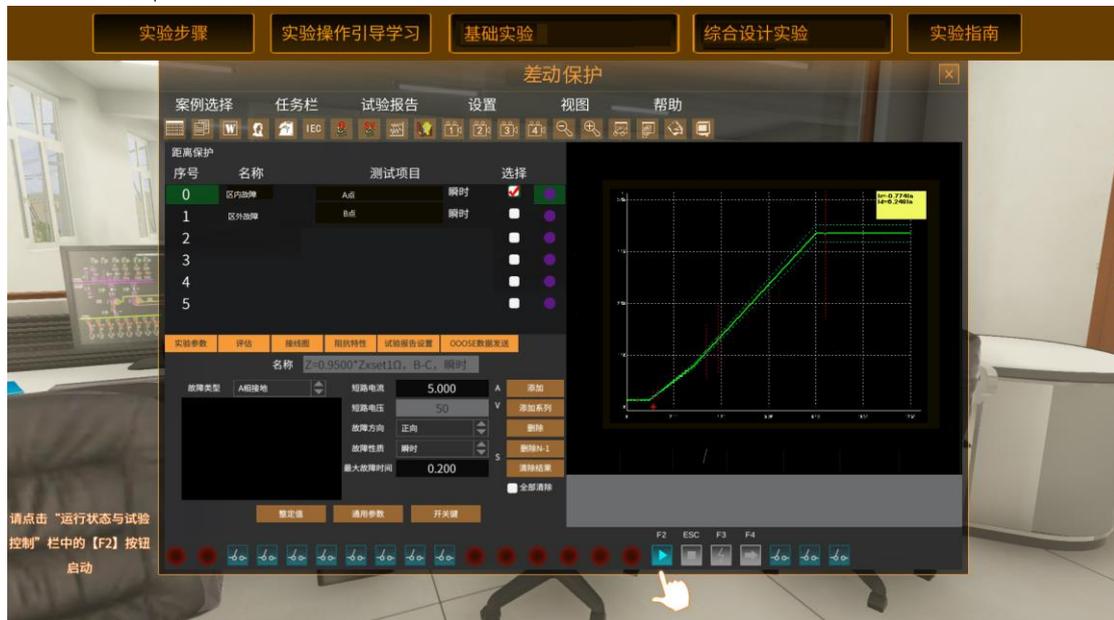


图 19 虚拟差动保护实验测试故障启动界面图

同样，在图 19 所示界面左上部列表窗口中，将第 2 项“选择”栏中设置为打勾状态，其余选择为未打勾状态，点击保护测试界面窗口中最下边的“运行状态与试验控制”栏中的【F2】，【复归】保护装置，并点击【虚拟实验测试终端】

界面中的【F3】按钮，启动变压器区外故障试验。

步骤8. 记录变压器差动模拟故障实验测试结果

实验测试启动后,保护装置及断路器有可能会动作,观察保护装置动作情况,并记录保护装置动作信息,这可以通过保护装置的 LCD 触摸屏中查看并记录,如图 20 和图 21 所示。



图 20 故障测试保护装置动作后断路器跳闸提示图



图 21 模拟保护装置面板触摸屏差动保护动作信息图

同样,在【监控中心控制室】场景的【监控系统主站】界面的【告警信息】窗口中,也可以观察到故障测试结果的相关信息。

步骤9. 故障现象观察

对于距离保护装置动作情况,可通过观察保护装置面板的指示灯、断路器跳闸状态、故障点的短路情况获取相关信息(如图 22),所示,另外,还可以在虚

拟场景中观察故障线路短路情况，如图 22 所示。



图 22 模拟变压器故障场景图

步骤10. 故障录波波形获取

当实验测试故障发生后，如果模拟继电保护装置动作，则保护装置将录取故障电压、电流波形，可通过监控主站的设备管理进程界面中获取，具体操作是：

在设备管理进程界面中，展开窗口左侧的“工程对象库”，找到“2#主变保护(PSL 1200U)”中的“保护 LD”，点击窗口右侧的“录波”选项卡，如图 23 所示，选择正确的录波“区号”，点击“上装”按钮（如图 24），在弹出的文件对话框中（如图 25），选择与故障时间对应的文件名，点击【打开】按钮后，显示【上装录波数据文件成功】消息框，如图 26 所示，可以查看保护装置录波波形，并通过拷屏获取波形文件，用于实验分析，如图 27 所示。



图 23 保护装置录波波形获取界面图



图 24 保护装置录波数据上装界面图



图 25 保护装置录波数据文件选择界面图

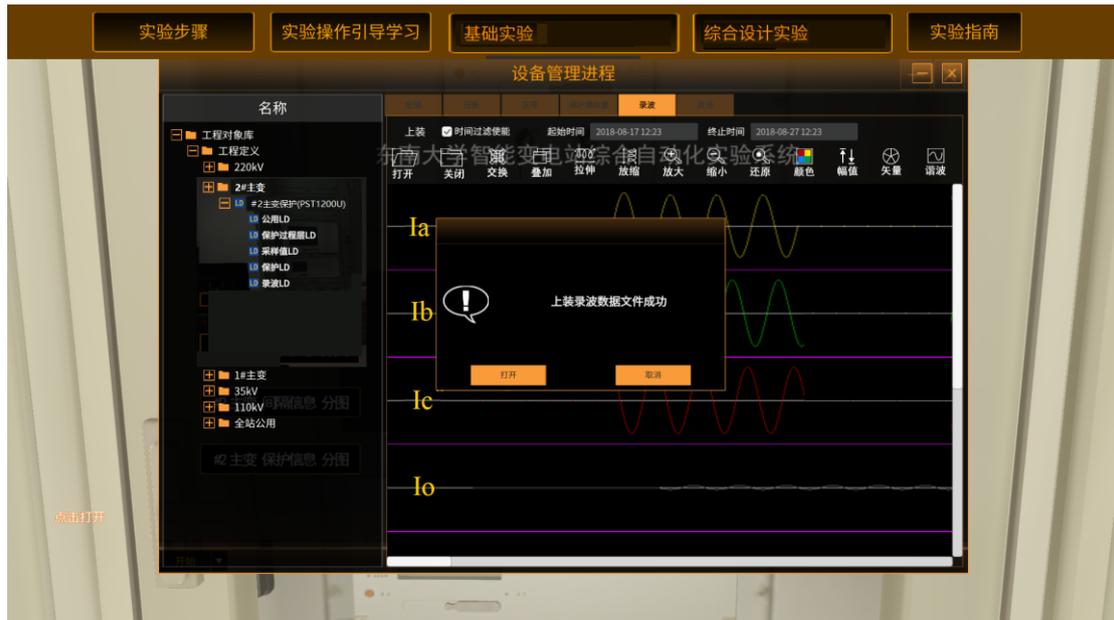


图 26 保护装置录波数据上装消息框界面图

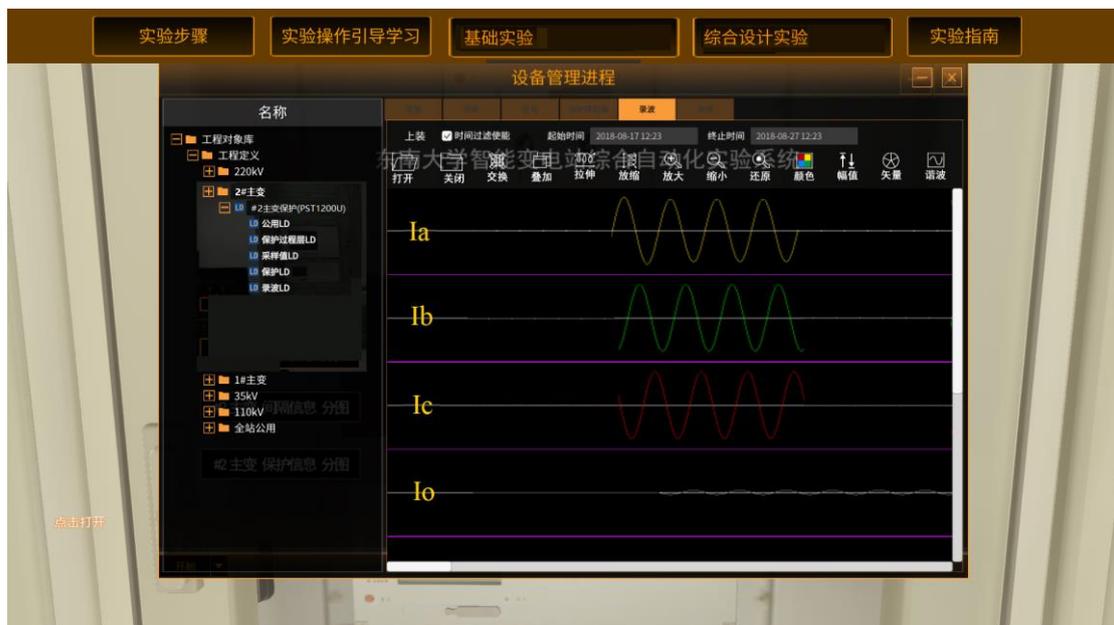


图 27 保护装置录波波形显示界面图

步骤11. 综合设计实验项目的测试与实验

在综合设计实验中，系统自动随机选择变压器容量参数，学生根据新的变压器容量参数重新计算保护装置定值，设计实验方案，选择不同故障类型、不同故障地点（区内或区外）、装置定值参数进行实验，观察继电保护装置动作情况，获取故障电压、电流波形和故障数据，并分析结果的正确性。

综合设计实验中，主要包括【实验基础参数浏览】、【装置参数设置与实验测试】两个模块，学生通过【实验基础参数浏览】模块浏览系统运行参数，计算保护装置定值，然后，在通过【装置参数设置与实验测试】模块中不同场景的设备

参数设置与操作（其操作可参考基础实验部分），选择不同故障点进行不同短路故障实验，录取短路时刻的电压、电流波形，探究保护装置的动作行为，分析与验证继电保护装置工作机理。

该实验中，学生实验方案的设计需要考虑以下方面：

- 1、继电保护定值计算的正确性与合理性；
- 2、实验场景的转换及实验步骤的合理安排；
- 3、实验结果的分析与判断；
- 4、实验故障类型与故障参数的选取；

综合设计实验中，其灵活性体现在如下方面：

- 1、实验过程及实验结果是通过算法模型的计算得到的，其不依赖于固定参数；
 - 2、实验场景可灵活转换，不受前后步骤限制，与真实环境一样；
 - 3、实验中的参数设置作为计算模型的输入，其结果与真实情况一致；
- 实验故障参数可针对不同故障点、不同故障类型灵活设置。

五、实验数据结果记录

实验完成后，参照下表记录相关数据。

表3 PST 1200U 变压器保护装置差动保护实验数据记录表

序号	测试项目	制动电流	差动电流	动作时间	出口断路器是否动作
1	区内故障1				
2	区外故障2				

根据获取的数据及录波波形，做如下分析：

1) 变压器区内故障差动保护实验数据分析

对于变压器区内差动保护，依据保护动作情况、动作时间、保护装置的定值，以及录波波形，计算差动电流的幅值与相角，比较差动与制动电流等参数的差别，根据变压器差动原理及相关公式，分析保护装置差动保护动作的正确性，校验定值的正确性。

2) 变压器区外故障差动保护实验数据分析

对于变压器区外差动保护，依据保护动作情况、动作时间、保护装置的定值，以及录波波形，计算差动电流的幅值与相角，比较差动与制动电流等参数的差别，根据变压器差动原理及相关公式，分析保护装置差动保护动作的正确性，校验定值的正确性；

3) 综合设计实验数据分析

根据综合设计所得结果，探究和分析定值计算与设置的合理性、正确性。

六、实验报告

(1) 实验过程中，记录实验数据，并通过监控中心控制台终端获取录波波形数据；

(2) 根据实验数据及故障录波波形，计算差动电流的幅值与相角等参数，分析保护装置差动保护动作及定值的正确性；

(3) 根据相关理论，计算并判定保护装置差动保护定值设置与装置动作的准确值，与实验数据对比，分析保护装置定值整定与动作的正确性。

七、实验研讨与思考题

1. 为什么在进行差动保护实验时，要退出变压器的后备保护功能？
2. 变压器差动保护定值是如何影响稳态差动比率制动曲线的？试分析稳态差动比率制动保护的定值整定计算方法。