

电力系统稳态分析 实验指导书



浙江大学电气工程学院电机工程学系

2021年11月

杭州·玉泉

前 言

《电力系统分析综合实验》课程作为高等学校电气工程及其自动化专业（电力系统方向）的专业课程，希望通过学生自己动手，获得更强的实际系统概念，要求学生通过本课程学习，掌握发电机并网调节，稳态运行方式改变，有功和无功调节和暂态稳定。

随着电力系统分析理论和方法研究的深入和完善，以及计算机技术的进步，电力系统数字模拟（数字仿真、即建立数学模型、列出数学方程并进行求解和分析）技术得到了迅速的发展和广泛的应用，并在实践中取得了巨大的成果和效益。同时作为电力系统研究和实验的另一种重要方法—电力系统动态模拟，同样是目前研究运行中的和筹建中的电力系统的重要工具，也是训练系统运行人员和电力系统专业的良好有效的教学工具。完整的电力系统分析要求既需要掌握电力系统数字模拟（数字仿真）技术，也需要掌握电力系统动态模拟技术。

电力系统分析综合实验通过同步发电机准同期并列实验和对单机一无穷大系统的动态模拟，了解和掌握同步发电机的并网原理和操作；通过励磁控制实验，学习如何稳定电压，合理分配无功功率和提高电力系统稳定性；通过暂态稳定控制实验，学习如何提高电力系统稳定性的综合知识和方法；通过潮流分析实验巩固电力系统有功、无功的概念，掌握潮流计算；通过变压器暂态分析实验，深入分析变压器模型、负载和通电时机等因素对通电暂态、稳态过程的影响；学习实验研究结果的整理和分析、以及试验报告的制定。

本实验采用的实验装置为武汉华工大电力自动技术研究所生产的“WDT-II型电力系统综合自动化试验装置”，采用的数字仿真程序为 PSD-BPA 和 PSCAD/EMTDC。

编制：王晓菲

校对：王康元

审核：江道灼

**!!! 实验前必须认真学习实验指导书，
切实掌握实验内容、操作步骤和有关注意事项。**

目录

目录.....	III
第一章 电力系统动态模拟与数字仿真.....	1
一. 电力系统动态模拟原理及其特点.....	1
二. 模拟要素.....	2
三. 模拟比例和模拟系统额定值的选择.....	3
四. 模拟试验中的测量.....	4
五. WDT-II型电力系统综合自动化试验装置.....	5
六. 电力系统仿真工具介绍.....	7
第二章 同步发电机准同期并列实验.....	9
一. 实验目的.....	9
二. 原理与说明.....	9
三. 实验项目和方法.....	10
四. 分析与思考.....	13
第三章 单机一无穷大系统实验.....	14
一. 实验目的.....	14
二. 原理与说明.....	14
三. 实验项目和方法.....	14
四. 分析与思考.....	16
第四章 同步发电机励磁控制实验.....	17
一. 实验目的.....	17
二. 原理与说明.....	17
三. 实验项目和方法.....	18
四. 分析与思考.....	24
第五章 电力系统暂态稳定实验.....	25
一. 实验目的.....	25
二. 原理与说明.....	25
三. 实验项目与方法.....	26
四. 分析和思考.....	30
第六章 PSCAD/EMTDC 软件介绍.....	31
一. 概述.....	31
二. 主要设置与基本操作.....	32
第七章 潮流分析实验.....	57
一. 实验目的.....	57
二. 原理与说明.....	57
三. 实验项目和方法.....	59
四. 分析与思考.....	63
附录：潮流分析实验图表.....	64
第八章 变压器暂态分析实验.....	77
一. 实验目的.....	77
二. 原理与说明.....	77
三. 实验项目和方法.....	86

四、分析与思考.....	91
附录：变压器暂态分析实验图表.....	92
第九章 PSD-BPA 软件介绍.....	103
一、PSD 软件介绍.....	103
二、BPA 程序主要功能.....	104
三、BPA 潮流计算方法.....	104
四、BPA 程序计算流程.....	105
五、数据文件一般结构.....	105
第十章 BPA 电力系统建模实验.....	107
一、实验目的.....	107
二、原理与说明.....	107
三、实验项目和方法.....	119
四、分析与思考.....	123
附录：.....	123
第十一章 BPA 潮流分析实验.....	125
一、实验目的.....	125
二、原理与说明.....	125
三、实验项目和方法.....	136
四、分析与思考.....	139
第十二章 电力系统电压控制实验.....	141
一、实验目的.....	141
二、原理与说明.....	141
三、实验项目和方法.....	144
四、分析与思考.....	150
附录：.....	151

第一章 电力系统动态模拟与数字仿真

一. 电力系统动态模拟原理及其特点

电力系统动态模拟是一种根据相似原理建立起来的物理模拟，能保证在模拟系统上所反映的过程与实际系统中的过程相似，并且模型上的过程与原型的过程具有相同的物理实质，所以电力系统动态模拟实际上就是电力系统在实验室的复制品，是研究电力系统原型或预建电力系统的一个重要实验工具。

电力系统动态模拟具有以下特点：

- 1、能方便直观地重现实际电力系统的各种运行状态和暂态过程，因此具有比数学模型更接近第一性的特点；
- 2、能方便重复地进行电力系统各类故障的实验研究，这种实验在实际电力系统中进行时往往受到种种限制，因而是很难经常全面进行的；
- 3、对于某些新问题或物理过程由于受到现阶段认识的限制，很难确立对象的数学模型、写出数学方程，这时数字模拟就很难进行仿真，而物理模拟则可以研究这些物理过程并探求过程的本质；
- 4、在动态模拟系统上可以接入工业用的控制、调节和保护装置，从而进行初步的运行考验，以检验其性能，同时为参数的整定和装置的改进提供依据；
- 5、动态模拟具有一定的通用性，能较方便地模拟不同的电力系统。

因此，电力系统动态模拟是目前研究运行中的和筹建中的电力系统的重要工具，也是训练系统运行人员和电力系统专业的良好有效的教学工具。它与数字模拟相配合，才能保证电力系统的实验研究工作有效性和可靠性。

二. 模拟要素

电力系统动态模拟包括同步发电机、原动机、变压器、输电线路、负荷、等值系统（相当于无限大系统）模拟等：

· 同步发电机

模型机的参数（同步电抗、瞬变电抗、超瞬变电抗、负序电抗、零序电抗、时间常数和惯性时间常数等）按与原型机的标么值相等的条件进行模拟。

· 原动机

在研究现代电力系统运行及其过渡过程时，仅仅考虑系统中各电路元件的参数和特性是不够的，还必须考虑包括调速系统在内的整个原动机的特性。在电力系统动态模拟上，一般不去研究原动机内部的过程和它的结构，主要是研究电力系统中的机电过程，所以原动机的模拟要求反映其轴上转矩变化过程与原型机相似。

· 变压器

电力系统动态模拟研究的是电力系统的电磁过程，因此可以一个集中参数元件来模拟（变压器短路电抗、铜耗、短路损耗、额定电压下的空载励磁电流、空载损耗、零序电抗的标么值及标么空载特性与原型相等）。模拟变压器初级与次级绕组都分成许多组，通过串、并联的方法获得模拟所要求的变比。磁路系统有可调的磁分路，以改变模拟变压器漏抗的标么值和原型相同。

· 输电线路

输电线路是具有分布参数的电路，而在实验室中实现较为困难。电力系统动态模拟只要求线路上的某些点的电压和电流随时间变化过程相似，因此可用等值链形电路以分布集中参数来模拟分布参数。

· 负荷

电力系统的负荷是一个复杂的多变量函数，各种不同的负荷在电力系统过渡过程中产生的作用各不相同。因此，应从电力系统负荷的实际调查出发，对各种负荷的比例作适当的配置，以尽量达到原型或接近原型。实际负荷中主要的类型有异步负载、同步负载、整流负载、照明负

载、电热负载、线路损耗及其他。

· 等值系统

等值系统模拟的特点是：其容量远远大于某个发电厂的容量，相比较之下可以认为是一个无限大系统，其模拟电压要求可调，以便等值系统的电压等级可变。通常用容量远大于模拟发电机容量的感应调压器来模拟等值系统。如本实验装置中同步发电机的容量为 2.5kVA，无穷大系统（自耦变压器）的容量为 15kVA。

三. 模拟比例和模拟系统额定值的选择

模拟比例一指研究对象原系统的有关参量和模拟系统的实际量之间的比例关系。当各种量纲的模拟比例保持了在原系统中各不同量纲之间的关系时，在模拟系统中出现的各种现象就能按比例地反映原系统的现象。

电力系统中存在着以下关系：

$$S = \sqrt{3}U_{\text{线}}I_{\text{线}}, \quad U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}, \quad Z = \frac{U_{\text{线}}^2}{S} \quad (\text{式 1})$$

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad T = \frac{L}{R}$$

令 m 表示各物理量的模拟比例，即 $m = \frac{\text{原型量}}{\text{模拟量}}$ ，并有如下的关系：

$$m_s = \frac{S_{\text{原}}}{S_{\text{模}}} = \frac{U_{\text{原}}I_{\text{原}}}{U_{\text{模}}I_{\text{模}}} = m_v \cdot m_i$$

$$m_z = \frac{Z_{\text{原}}}{Z_{\text{模}}} = \frac{U_{\text{原}}^2}{U_{\text{模}}^2} \cdot \frac{S_{\text{模}}}{S_{\text{原}}} = \frac{m_v^2}{m_s}$$

其中：

m_S : 功率比值

m_V : 电压比值

m_I : 电流比值

m_Z : 阻抗比值

在动态模拟系统中，往往采用 $\omega_{\text{模}} = \omega_{\text{原}}$ ，这样，各变量的时间坐标及相角关系可以和原型保持一致，因为模拟系统与原系统的频率相同，同时下列的模拟比例关系成立：

$$m_L = m_Z, \quad m_C = \frac{1}{m_Z}, \quad m_T = \frac{T_{\text{原}}}{T_{\text{模}}} = \frac{f_{\text{模}}}{f_{\text{原}}} = 1, \quad \frac{X_{\text{原}}}{R_{\text{原}}} = \frac{X_{\text{模}}}{R_{\text{模}}}$$

其中：

m_L : 电感比值

m_C : 电容比值

m_T : 时间比值

模拟比例的选择：上述在电压、电流、阻抗、功率的相互关系中，可以建立两个独立方程式（式 1），但却包括了四个模拟比，因此可以根据实验室模拟设备的限制条件，任取两个比例值，并根据两个方程式来确定余下的两个比例值，这样模拟系统与原型系统才具有相似性。

模拟系统额定值的选择要根据模拟试验室的设备情况来确定。

四. 模拟试验中的测量

电力系统中一些电气量的量测是通过电压互感器和电流互感器进行的，由于系统容量很大，电压互感器和电流互感器以及测量表计从系统中吸取的功率可以忽略不计。

电力系统动态模拟中一些电气量的量测是通过模拟电压互感器以及模拟电流互感器进行的，由于模拟系统容量远小于原型，模拟系统的互感器及测

量设备所吸取的功率对模拟系统来说就占有一定的比重，甚至对主回路的过渡过程产生较大的影响，使模型上的研究结果产生误差。所以模拟互感器需要特殊设计，除了准确满足测量要求外，希望它从主系统吸取的功率尽量的小。同时从接在互感器 2 次侧的表计中读取数据时需经过折算（模拟互感器的变比）才能得到模拟系统的实际值。

五、WDT-II 型电力系统综合自动化试验装置

电力系统分析实验采用的实验装置为武汉华工大电力自动技术研究所生产的“WDT-II 型电力系统综合自动化试验装置”。

本试验装置主要是为开设与电力系统运行（稳态及暂态）有关的教学实验而设计的。试验装置中的发电机、原动机、励磁系统及输电线路虽然没有按与实际电力系统的相似条件来进行物理仿真，但保持了“单机一无穷大”系统的特性，可以定性地、反复地、直观地实验和观测实际电力系统的各种运行状态。

· 发电机组

它是由同在一个轴上的三相同步发电机（ $S_N = 2.5\text{kVA}$ ， $U_N = 400\text{V}$ ， $n_N = 1500\text{r. p. m}$ ），模拟原动机用的直流电动机（ $P_N = 2.2\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ）以及测速装置和功率角指示器组成。直流电动机、同步发电机经弹性联轴器对轴联结后组装在一个活动底盘上构成可移动式机组。具有结构紧凑、占地少、移动轻便等优点，机组的活动底盘有四个螺旋式支脚和三个橡皮轮，将支脚旋下即可开机实验。

· 试验操作台

它是由输电线路及保护单元、功率调节和同期单元，仪表测量和短路故障模拟单元等组成。

输电线路采用具有中间开关站的双回路输电线路模型，并对其中一段线路设有“YHB-II 型微机保护”，此线路的过流保护还具有单相自动重合闸功能。

功率调节和同期单元，由“TGS-04 型微机调速装置”、“WL-04B 微机励磁调节器”、“HGWT-03 微机准同期装置”等微型自动装置以及和其相对应的手动装置组成。

仪表测量和短路故障模拟单元由各种测量表计及其切换开关、各种带灯操作按钮以及观测波形用的测试孔和各种类型的短路故障操作等部分组成。

实验中的操作均在试验操作屏台上进行。

· 无穷大系统

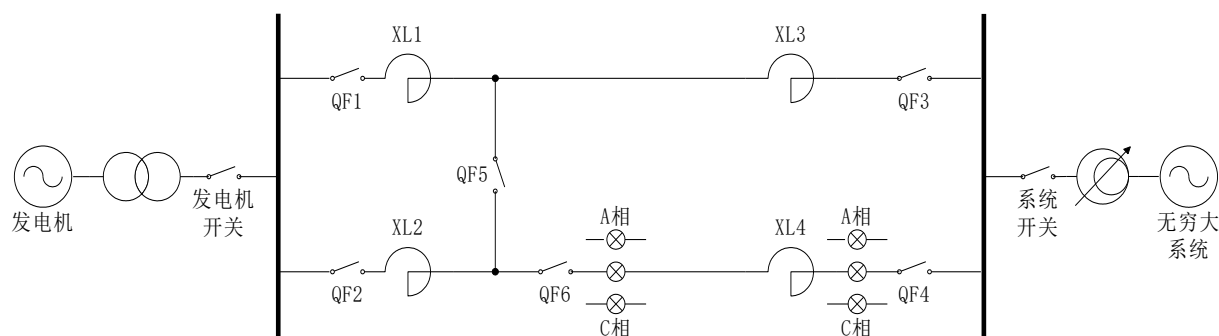
无穷大系统是由 15kVA 的自耦变压器组成。通过调整自耦变压器的电压可以改变无穷大母线的电压。

试验操作台的“操作面板”上有模拟接线图、操作按钮和切换开关以及指示灯和测量仪表等。操作按钮与模拟接线图中被操作的对象结合在一起，并用灯光颜色表示其工作状态，具有直观的效果。红色灯亮表示开关在合闸位置，绿色灯亮表示开关在分闸位置。

本实验系统是一种物理模拟。原动机采用直流电动机来模拟，当然，它们的特性与大型原动机是不相似的。原动机输出功率的大小，可通过给定直流电动机的电枢电压来调节。实验系统用标准小型三相同步发电机来模拟电力系统的同步发电机，虽然其参数不能与大型发电机相似，但也可以看成是一种具有特殊参数的电力系统的发电机。发电机的励磁系统可以用外加直流电源通过手动来调节，也可以切换到台上的微机励磁调节器来实现自动调节。实验台的输电线路是用多个接成链型的电抗线圈来模拟，其电抗值满足相似条件。“无穷大”母线就直接用实验室的交流电源，因此它是由实际电力系统供电的，因此，它基本上符合“无穷大”母线的条件。

为了进行测量，实验台设置了测量系统、以测量各种电量（电流、电压、功率、频率）。为了测量发电机转子与系统的相对位置角（功率角），在发电机轴上装设了闪光测角装置。此外，台上还设置了模拟短路故障等控制设备。

本试验装置的一次系统接线图如下：



单机—无穷大系统一次接线图

六. 电力系统仿真工具介绍

电力系统数字仿真工具可分为两类：实时数字仿真器，离线数字仿真程序。

实时数字仿真器和离线数字仿真程序都是基于数学模型来实现的。两者的区别在于，实时数字仿真器通常采用多处理器并行计算，计算速度可以达到实时的要求；而离线数字仿真程序采用串行计算，计算速度较慢。对于实时数字仿真器，除了软件技术以外，还需要相关硬件装置的配合，以保证仿真时刻与外部时钟的精确同步。电力系统规模越大，节点个数越多，实时数字仿真器耗费的代价越大。要合理模拟一个大规模交直流电力系统，可能需要几个甚至上百个实时数字仿真器，其耗费的代价与数字仿真程序是不可比拟的。考虑到经济性和硬件条件限制，实时数字仿真器主要应用在为各种电力系统保护与控制装置提供高度模拟现场实际的测试环境，而离线数字仿真程序多数用于对时间没有严格要求的情况下的仿真计算。

数字仿真程序依据仿真的过程主要分为两类：机电暂态仿真程序和电磁暂态仿真程序。机电暂态过程是指由于发电机和电动机电磁转矩的变化引起电机转子机械运动的变化过程。机电暂态过程的仿真主要研究电力系统受到大扰动后的暂态稳定和受到小扰动后的静态稳定性能，研究的目的是为了规划安全可靠的电网结构，构筑安全稳定的控制系统以及控制策略。其中暂态稳定分析是研究电力系统受到诸如短路故障，切除线路、发电机、负荷，发电机失去励磁或者冲击性负荷等大扰动作用下，电力系统的动态行为和保持同步稳定运行的能力。其关注点在于能量的传递，与能量传递关系不密切的因素都可以忽略不计。在数学模型上，机电暂态仿真程序将系统划分为正负零3个序网，以向量形式联立求解描述发电机及励磁、调速系统动态特性的微分方程组和描述元件特性及系统网络拓扑结构的代数方程组，物理量为基频向量。目前，国内常用的机电暂态仿真程序是电力系统综合程序(PSASP)和中国版BPA电力系统分析程序。国际上常用的有美国PTI的PSSE，美国EPRI的ETMSP，德国DigSilent的Power Factory。

电磁暂态过程是指元件电场以及相应电压和电流的变化过程，主要应用在选择元件设备、确定限制短路电流的措施、合理配置继电保护装置以及整定继电保护定值等场合。电磁暂态的求解涵盖了一定频率范围内的谐波分量。

在数学模型上，根据研究的过程不同，发电机模型可以是相当简化的等值电源模型，也可以是详细的 PARK 方程模型，甚至是考虑转子多刚体结构的模型；电力网络采用相坐标系统，即采用 a、b、c 三相模型或一般的全相模型，且必须用微分方程描述，系统中的物理量为瞬时值而不是基波向量的有效值。目前，使用较多的电磁暂态仿真程序有加拿大 Manitoba HVDC Research Center 开发的 PSCAD/EMTDC，各种版本的 EMTP 程序，如国内常用的 BPA-EMTP 和国际主流的 ATP-EMTP，以及德国 Siemens 的 NETOMAC。

第二章 同步发电机准同期并列实验

一. 实验目的

- 1、加深理解同步发电机准同期并列原理，掌握准同期并列条件；
- 2、掌握微机准同期控制器及模拟式综合整步表的使用方法；
- 3、熟悉同步发电机准同期并列过程；
- 4、观察、分析有关波形（*）。

二. 原理与说明

将同步发电机并入电力系统的合闸操作通常采用准同期并列方式。准同期并列要求在合闸前通过调整待并机组的电压和转速，当满足电压幅值和频率条件后，根据“恒定越前时间原理”，由运行操作人员手动或由准同期控制器自动选择合适时机发出合闸命令，这种并列操作的合闸冲击电流一般很小，并且机组投入电力系统后能被迅速拉入同步。根据并列操作自动化程度的不同，又分为：*手动准同期*、*半自动准同期*和*全自动准同期*三种方式。

正弦整步电压是不同频率的两正弦电压之差，其幅值作周期性的正弦规律变化。它能反映两个待并系统间的同步情况，如频率差、相角差以及电压幅值差。

线性整步电压反映的是不同频率的两方波电压间相角差的变化规律，其波形为三角波。它能反映两个待并系统间的频率差和相角差，并且不受电压幅值差的影响，因此得到广泛应用。

手动准同期并列，应在正弦整步电压的最低点（同相点）时合闸，考虑到断路器的固有合闸时间，实际发出合闸命令的时刻应提前一个相应时间或角度。

自动准同期并列，通常采用恒定越前时间原理工作，这个越前时间可按断路器的合闸时间整定。准同期控制器根据给定的允许压差和频差，不断检查准同期条件是否满足，在不满足要求时闭锁合闸并且发出均匀均频控制脉

冲。当所有条件满足时，在整定的越前时刻送出合闸脉冲。

三. 实验项目和方法

1. 机组微机启动和建压

- (1)在调速装置上检查“模拟调节”电位器指针是否指在 0 位置，如果不在，则应调到 0 位置；
- (2)合上操作台的“电源开关”，在调速装置、励磁调节器、微机准同期控制器上分别确认其“微机正常”灯为闪烁状态，在微机保护装置上确认“装置运行”灯为闪烁状态。在调速装置上确认“模拟方式”灯为熄灭状态，否则，松开“模拟方式”按钮。同时确认“并网”灯为熄灭状态，“输出 0”、“停机”灯亮。检查实验台上各开关状态：各开关信号灯应绿灯亮、红灯熄，调速装置面板上数码管在并网前显示发电机转速(左)和控制量(右)，在并网后显示控制量(左)和功率角(右)；
- (3)按调速装置上的“微机方式自动/手动”按钮使“微机自动”灯亮；
- (4)把操作台上“励磁方式”开关置于“微机它励”位置，在励磁调节器上确认“它励”灯亮；
- (5)在励磁调节器上选择恒 U_F 运行方式，合上“励磁开关”；
- (6)把实验台上“同期方式”开关置“断开”位置；
- (7)合上“系统开关”和线路开关“ QF_1 、 QF_3 ”，检查系统电压接近额定值 380V；
- (8)合上“原动机开关”，按“停机/开机”按钮使“开机”灯亮，调速装置将自动启动电动机到额定转速；
- (9)当机组转速升到 95%以上时，微机励磁调节器自动将发电机电压建压到与系统电压相等。

2. 手动准同期

2.1 按准同期并列条件合闸

将“同期方式”转换开关置“手动”位置。在这种情况下，要满足并列条件，需要手动调节发电机电压、频率，直至电压差、频差在允许范围内，相角差在零度前某一合适位置时，手动操作合闸按钮进行合闸。

观察微机准同期控制器上显示的发电机电压和系统电压，相应操作微机励磁调节器上的“增磁”或“减磁”按钮进行调压，直至微机准同期控制器上的“压差闭锁”灯熄灭。

观察微机准同期控制器上显示的发电机频率和系统频率，相应操作微机调速装置上的“增速”或“减速”按钮进行调速，直至微机准同期控制器上的“频差闭锁”灯熄灭。

此时表示压差、频差均满足条件，观察整步表上旋转灯位置，当旋转 0 度位置前某一合适时刻时，即可合闸（发电机开关）。观察记录合闸时的冲击电流（三相电流表设在发电机和发电机开关之间）等数据（以下的并列实验同）。

2. 2 偏离准同期并列条件合闸

实验要求：分别在单独一种并列条件不满足的情况下合闸，记录功率表冲击情况（下标 F—发电机、X—无穷大系统）：

- (1) 电压差相角差条件满足，频率差不满足，在 $f_F > f_X$ 和 $f_X > f_F$ 时手动合闸，观察并记录实验台上的有功功率表 P 和无功功率表 Q 指针偏转方向及偏转角度大小。**注意：频率差不要大于 0.5Hz**
- (2) 频率差相角差条件满足，电压差不满足，在 $V_F > V_X$ 和 $V_X > V_F$ 时手动合闸，观察并记录实验台上的有功功率表 P 和无功功率表 Q 指针偏转方向及偏转角度大小。**注意：电压差不要大于 10%额定电压**
- (3) 频率差电压差条件满足，相角差不满足，顺时针旋转和逆时针旋转时手动合闸，观察并记录实验台上的有功功率表 P 和无功功率表 Q 指针偏转方向及偏转角度大小。**注意：相角差不要大于 30 度**

注意：本实验项目仅限于实验室进行

3. 半自动准同期

将“同期方式”转换开关置“半自动”位置，按下准同期控制器上的“同期命令”按钮即向准同期控制器发出同期并列命令，此时，“同期命令”灯亮，“微机正常”灯闪烁加快。准同期控制器将给出相应操作指示信息，运行人员可以按这个指示进行相应操作（调速调压的方法同手动准同期）。

当压差、频差条件满足时，整步表上旋转灯光旋转至接近 0 度位置时，

整步表圆盘中心灯亮，表示全部条件满足，准同期控制器会自动发出合闸命令，“合闸出口”灯亮，随后“DL合”灯亮，表示已经合闸。“同期命令”灯熄，“微机正常”灯恢复正常闪烁，进入待命状态。

4. 全自动准同期

将“同期方式”转换开关置“全自动”位置，按下准同期控制器的“同期”按钮，“同期命令”灯亮，“微机正常”灯闪烁加快，此时，微机准同期控制器将自动进行均压、均频控制并检查合闸条件，一旦合闸条件满足即发出合闸命令。

在全自动过程中，观察当“升速”或“降速”命令指示灯亮时，调速装置上有什么反应；当“升压”或“降压”命令指示灯亮时，微机励磁调节器上有什么反应。当一次合闸过程完毕，控制器会自动解除合闸命令，避免二次合闸；此时“同期命令”灯熄，“微机正常”灯恢复到正常闪烁。

5. 停机

通过按下调速装置上的“减速”按钮和励磁调节器上的“减磁”按钮、分别将发电机输出的有功功率、无功功率减至0。跳开发电机开关后（即同步发电机与系统解列），跳开“励磁开关”灭磁，松开调速装置上的“停机/开机”按钮使“开机”灯灭、“停机”灯亮，即可自动停机。待机组停稳后断开“原动机开关”，然后跳开线路开关和无穷大电源开关，最后切断“电源开关”。

注意事项：

- 1、手动合闸时，仔细观察整步表上的旋转灯，在旋转灯接近0位置之前的某一时刻合闸。
- 2、当面板上的指示灯、数码管显示都停滞不动时，此时微机准同期控制器处于“死机”状态，按一下“复位”按钮可使微机准同期控制器恢复正常。
- 3、微机自动励磁调节器上的增磁/减磁按钮按键只持续5秒内有效，过了5秒后如需调节则松开按钮，重新按下。
- 4、在做同期方式切换时，应该先断开发电机开关，然后选择“同期方式”转换开关位置。

四. 分析与思考

- 1、比较手动准同期和自动准同期的调整并列过程。
- 2、相序不对（如系统侧相序为 A、B、C，发电机侧相序为 A、C、B）时能否并列？为什么？
- 3、电压互感器的极性如果一侧（系统侧或发电机侧）接反，会有什么结果？
- 4、合闸冲击电流的大小与哪些因素有关？
- 5、在 $f_F > f_X$ 、 $f_X > f_F$ 或 $V_F > V_X$ 、 $V_X > V_F$ 下并列时，机端有功功率表及无功功率表的指示有何特点？为什么？

第三章 单机一无穷大系统实验

一. 实验目的

了解和掌握三相对称稳态情况下，输电系统各种运行状态与运行参数的数值变化范围。

二. 原理与说明

通过本实验了解和掌握电力系统稳态对称运行特性，在巩固理论概念的同时掌握“数值概念”一如在典型运行方式下，用相对值表示的电压损耗、电压降落等数值范围，是用于判断运行报表或监视控制系统测量值是否正确的参数依据等。

三. 实验项目和方法

1. 机组手动启动和建压

- (1)在调速装置上检查“模拟调节”电位器指针是否指在 0 位置，如不在，则应调到 0 位置。将操作台上的“手动励磁”调节旋钮反时针旋到 0；
- (2)合上操作台的“电源开关”，在调速装置、励磁调节器、微机准同期控制器上分别确认其“微机正常”灯为闪烁状态，在微机保护装置上确认“装置运行”灯为闪烁状态。在调速装置上确认“并网”灯为熄灭状态，“输出 0”、“停机”灯亮。检查实验台上各开关状态：各开关信号灯应绿灯亮、红灯熄；
- (3)按调速装置上的“模拟方式”按钮使“模拟方式”灯亮；
- (4)把操作台上“励磁方式”开关置于“手动励磁”位置，在励磁调节器上确认“它励”灯亮；
- (5)在励磁调节器上选择恒 U_F 运行方式，合上“励磁开关”；

- (6)把实验台上“同期方式”开关置“断开”位置；
- (7)合上“系统开关”和线路开关“QF₂、QF₄、QF₆”，检查系统电压接近额定值380V；
- (8)合上“原动机开关”，按“停机/开机”按钮使“开机”灯亮，再顺时针旋转调速装置上的指针电位器，当发电机旋转后，观察机组稳定情况，然后通过顺时针旋转指针电位器缓慢加速到额定转速；
- (9)顺时针调节操作台上的“手动励磁”旋钮增加励磁电压，在维持发电机为额定频率时，增加发电机电压为额定电压。

2. 并网

请参照第三章中的手动准同期（按准同期并列条件合闸）的方法进行并网操作。

3. 稳态对称运行实验

并网后，首先按照下表所列的运行方式1的线路开关状态进行线路开关的合闸和分闸，通过调节调速装置上的指针电位器来调整发电机输出的有功功率、通过调节“手动励磁”旋钮来调整发电机输出的无功功率，分别使输电系统处于两种不同的运行状态（不同大小的有功功率、不同方向的无功功率）进行实验。

在每一种运行状态下，分别按下表所列的三种电网运行方式进行实验（即按下表所列开关状态进行线路开关的合闸和分闸），观察、记录线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值，计算、分析、比较运行方式不同时，运行参数变化的特点及数值范围—电压损耗、电压降落、沿线电压变化、两端无功功率的方向（根据沿线电压大小比较判断）等。同时针对不同运行状态下的实验结果进行计算、比较和分析。

运行方式1（单回路）的线路开关状态：

线路开关	QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6
开关状态	分	合	分	合	分	合

运行方式2（双回路）的线路开关状态：

线路开关	QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6
开关状态	合	合	合	合	分	合

运行方式 3 的线路开关状态：

线路开关	QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6
开关状态	合	合	分	合	合	合

4. 停机

通过反时针旋转调速装置上的指针电位器以及操作台上的“手动励磁”旋钮分别将发电机输出的有功功率、无功功率减至 0。跳开发电机开关后（即同步发电机与系统解列），跳开“励磁开关”灭磁。继续反时针旋转调速装置上的指针电位器直到 0 位置，使其输出为 0，此时调速装置上的“输出 0”灯亮。待机组停稳后断开“原动机开关”，松开“模拟方式”按钮，“模拟方式”灯灭，“微机自动”灯亮。然后跳开线路开关和无穷大电源开关，最后切断“电源开关”。

注意事项：

- 1、切换线路开关状态时注意不要造成系统解列。
- 2、调整发电机输出的有功功率和无功功率不宜过大。

四. 分析与思考

- 1、根据不同运行方式下的线路首、末端和中间开关站的实验数据，分析、比较运行方式不同时，运行参数变化的特点和变化范围。
- 2、什么是电压损耗、电压降落？举例说明其计算方法。
- 3、影响简单系统静态稳定性的因素有哪些？
- 4、提高电力系统静态稳定有哪些措施？

第四章 同步发电机励磁控制实验

一、实验目的

1. 加深理解同步发电机励磁调节原理和励磁控制系统的基本任务；
2. 了解自并励励磁方式和它励励磁方式的特点；
3. 熟悉三相全控桥整流、逆变的工作波形；观察触发脉冲及其相位移动；
4. 了解微机励磁调节器的基本控制方式；
5. 掌握励磁调节器的基本使用方法。

二、原理与说明

同步发电机的励磁系统由励磁功率单元和励磁调节器两部分组成，它们和同步发电机结合在一起就构成一个闭环反馈控制系统，称为励磁控制系统。励磁控制系统的三大基本任务是：稳定电压，合理分配无功功率和提高电力系统稳定性。

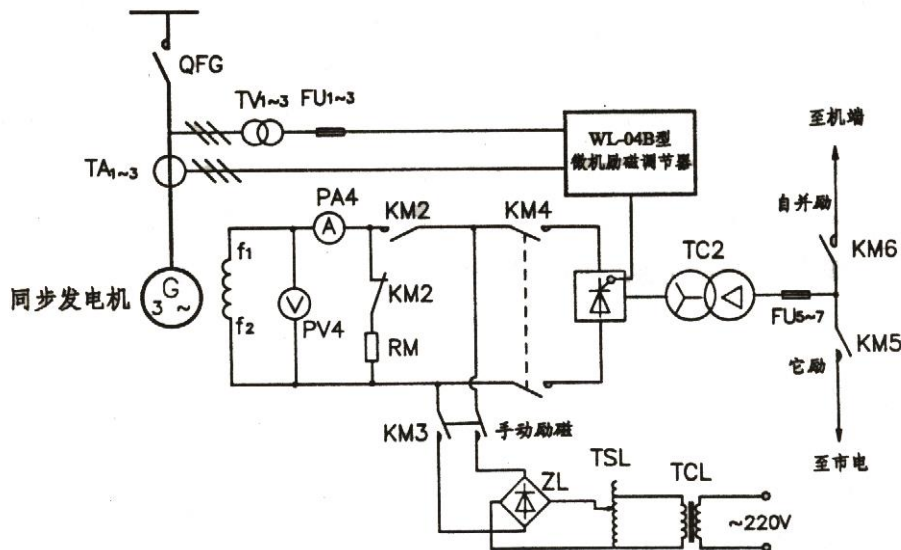


图1 励磁控制系统示意图

实验用的励磁控制系统示意图如图1所示。可供选择的励磁方式有两种：自并励和它励。当三相全控桥的交流励磁电源取自发电机机端时，构成自并励励磁系统。而当交流励磁电源取自 380V 市电时，构成它励励磁系统。两种励磁方式的可控整流桥均是由微机自动励磁调节器控制的，触发脉冲为双脉冲，具有最大最小 α 角限制。

微机励磁调节器的控制方式有四种：恒 U_F (保持机端电压稳定)、恒 I_L (保持励磁电流稳定)、恒 Q (保持发电机输出无功功率稳定) 和恒 α (保持控制角稳定)。其中，恒 α 方式是一种开环控制方式，只限于它励方式下使用。

同步发电机并入电力系统之前，励磁调节装置能维持机端电压在给定水平。当操作励磁调节器的增减磁按钮，可以升高或降低发电机电压；当发电机并网运行时，操作励磁调节器的增减磁按钮，可以增加或减少发电机的无功输出，其机端电压按调差特性曲线变化。

发电机正常运行时，三相全控桥处于整流状态，控制角 α 小于 90° ；当正常停机或事故停机时，调节器使控制角 α 大于 90° ，实现逆变灭磁。

三、实验项目和方法

(一) 同步发电机起励实验

同步发电机的起励有三种：恒 U_F 方式起励，恒 α 方式起励和恒 I_L 方式起励。其中，除了恒 α 方式起励只能在它励方式下有效外，其余两种方式起励都可以分别在它励和自并励两种励磁方式下进行。

恒 U_F 方式起励，现代励磁调节器通常有“设定电压起励”和“跟踪系统电压起励”的两种起励方式。设定电压起励，是指电压设定值由运行人员手动设定，起励后的发电机电压稳定在手动设定的电压水平上；跟踪系统电压起励，是指电压设定值自动跟踪系统电压，人工不能干预，起励后的发电机电压稳定在与系统电压相同的电压水平上，有效跟踪范围为 $85\% \sim 115\%$ 额定电压；“跟踪系统电压起励”方式是发电机正常发电运行默认的起励方式，而“设定电压起励”方式通常用于励磁系统的调试试验。

恒 I_L 方式起励，也是一种用于试验的起励方式，其设定值由程序自动设定，人工不能干预，起励后的发电机电压一般为 20% 额定电压左右；恒 α 方式

起励只适用于它励励磁方式，可以做到从零电压或残压开始由人工调节逐渐增加励磁，完成起励建压任务。

1. 恒 U_F 方式起励步骤

(1) 将“励磁方式开关”切到“微机自励”方式，投入“励磁开关”；

(2) 按下“恒 U_F ”按钮选择恒 U_F 控制方式，此时恒 U_F 指示灯亮；

将调节器操作面板上的“灭磁”按钮按下，此时灭磁指示灯亮，表示处于灭磁位置；

(3) 启动机组；

(4) 当转速接近额定时，(频率 $\geq 47\text{Hz}$)，将“灭磁”按钮松开，发电机起励建压。

注意观察在起励时励磁电流和励磁电压的变化(看励磁电流表和电压表)。

观察起励时间，上升速度，超调，振荡次数，稳定时间等指标，记录起励后的稳态电压和系统电压。

上述的这种起励方式是通过手动解除“灭磁”状态完成的，实际上还可以让发电机自动完成起励，其操作步骤如下：

(1) 将“励磁方式开关”切到“微机自励”方式，投入“励磁开关”；

(2) 按下“恒 U_F ”按钮选择恒 U_F 控制方式，此时恒 U_F 指示灯亮；

(3) 使调节器操作面板上的“灭磁”按钮为弹起松开状态(注意，此时灭磁指示灯仍然是亮的)；

(4) 启动机组；

(5) 注意观察，当发电机转速接近额定时(频率 $\geq 47\text{Hz}$)，灭磁灯自动熄灭，机组自动起励建压，整个起励过程由机组转速控制，无需人工干预，这就是发电厂机组的正常起励方式。同理，发电机停机时，也可由转速控制逆变灭磁。

改变系统电压，重复起励(无需停机、开机，只需灭磁、解除灭磁)，观察记录发电机电压的跟踪精度和有效跟踪范围以及在有效跟踪范围外起励的稳定电压。

按下灭磁按钮并断开励磁开关，将“励磁方式开关”改切到“微机它励”位置，恢复投入“励磁开关”(**注意**：若改换励磁方式时，必须首先按下灭磁按钮并断开励磁开关！否则将可能引起转子过电压，危及励磁系统安全。)本励磁调节器将它励恒 U_F 运行方式下的起励模式设计成“设定电压起励”方式

(这里只是为了试验方便,实际励磁调节器不论何种励磁方式均可有两种恒 U_F 起励方式),起励前允许运行人员手动借助增减磁按钮设定电压给定值,选择范围为 $0\sim 110\%$ 额定电压。用灭磁和解除灭磁的方法,重复进行不同设定值的起励试验,观察起励过程,记录设定值和起励后的稳定值。

2. 恒 I_L 方式起励步骤

- (1) 将“励磁方式开关”切到“微机自励”方式或者“微机它励”方式,投入“励磁开关”;
- (2) 按下“恒 I_L ”按钮选择恒 I_L 控制方式,此时恒 I_L 指示灯亮;
- (3) 将调节器操作面板上的“灭磁”按钮按下,此时灭磁指示灯亮,表示处于灭磁位置;
- (4) 启动机组;
- (5) 当转速接近额定时(频率 $\geq 47\text{Hz}$),将“灭磁”按钮松开,发电机自动起励建压,记录起励后的稳定电压。起励完成后,操作增减磁按钮可以自由调整发电机电压。

3. 恒 α 方式起励步骤

- (1) 将“励磁方式开关”切到“微机它励”方式,投入“励磁开关”;
- (2) 按下恒 α 按钮选择恒 α 控制方式,此时恒 α 指示灯亮;
- (3) 将调节器操作面板上的“灭磁”按钮按下,此时灭磁指示灯亮,表示处于灭磁位置;
- (4) 启动机组;
- (5) 当转速接近额定时(频率 $\geq 47\text{Hz}$),将“灭磁”按钮松开,然后手动增磁,直到发电机起励建压;
- (6) 注意比较恒 α 方式起励与前两种起励方式有何不同。

(二) 控制方式及其相互切换

本型微机励磁调节器具有恒 U_F ，恒 I_L ，恒 Q ，恒 α 等四种控制方式，分别具有各自特点，请通过以下试验自行体会和总结。

1. 恒 U_F 方式

选择它励恒 U_F 方式，开机建压不并网，改变机组转速 45HZ~55HZ，记录频率与发电机电压、励磁电流、控制角 α 的关系数据：

表 2-2

发电机频率	发电机电压	励磁电流	励磁电压	控制角 α
46Hz				
48Hz				
50Hz				
52Hz				
54Hz				

2. 恒 I_L 方式

选择它励恒 I_L 方式，开机建压不并网，改变机组转速 45HZ~55HZ，记录频率与发电机电压、励磁电流、控制角 α 的关系数据：

表 2-3

发电机频率	发电机电压	励磁电流	励磁电压	控制角 α
46Hz				
48Hz				
50Hz				
52Hz				
54Hz				

3. 恒 α 方式

选择它励恒 α 方式，开机建压不并网，改变机组转速 45HZ~55HZ，记录

频率与发电机电压、励磁电流、控制角 α 的关系数据：

表 2-4

发电机频率	发电机电压	励磁电流	励磁电压	控制角 α
46Hz				
48Hz				
50Hz				
52Hz				
54Hz				

4. 恒 Q 方式

选择它励恒 U_F 方式，开机建压，并网后选择恒 Q 方式(并网前恒 Q 方式非法，调节器拒绝接受恒 Q 命令)，带一定的有功、无功负荷后，记录下系统电压为 380V 时发电机的初始状态，注意方式切换时，要在此状态下进行。改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角 α ，无功功率的关系数据：

表 2-5

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 α	有功功率	无功功率
360V						
370V						
380V						
390V						
400V						

将系统电压恢复到 380V，励磁调节器控制方式选择为恒 U_F 方式，改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角 α ，无功功率的关系数据：

表 2-6

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 α	有功功率	无功功率
360V						
370V						
380V						
390V						
400V						

将系统电压恢复到 380V，励磁调节器控制方式选择为恒 I_L 方式，改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角 α ，无功功率的关系数据：

表 2-7

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 α	有功功率	无功功率
360V						
370V						
380V						
390V						
400V						

将系统电压恢复到 380V，励磁调节器控制方式选择为恒 α 方式，改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角 α ，无功功率的关系数据：

表 2-8

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 α	有功功率	无功功率
360V						
370V						
380V						
390V						
400V						

注意：四种控制方式相互切换时，切换前后运行工作点应重合。

(三) 停机灭磁

发电机解列后，直接控制调速器停机，励磁调节器在转速下降到 43HZ 以下时自动进行逆变灭磁。待机组停稳，断开原动机开关，跳开励磁和线路等开关，切除操作电源总开关。

四 分析与思考

1. 三相可控桥对触发脉冲有什么要求？
2. 为什么在恒 α 方式下，必须手动“增磁”才能起励建压？
3. 比较恒 U_F 方式起励、恒 I_L 方式起励和恒 α 方式起励有何不同？
4. 逆变灭磁与跳励磁开关灭磁主要有什么区别？
5. 比较在它励方式下逆变灭磁与在自并励下逆变灭磁有什么差别？
6. 比较四种运行方式：恒 U_F 、恒 I_L 、恒 Q 和恒 α 的特点，说说他们各适合在何种场合应用？对电力系统运行而言，哪一种运行方式最好？试就电压质量，无功负荷平衡，电力系统稳定等方面进行比较。

第五章 电力系统暂态稳定实验

一、实验目的

1. 通过实验加深对电力系统暂态稳定内容的理解，使课堂理论教学与实践结合，提高学生的感性认识。
2. 学生通过实际操作，从实验中观察到系统失步现象和掌握正确处理措施。
3. 用数字式记忆示波器测出短路时短路电流的非周期分量波形图，并进行分析。

二、原理与说明

电力系统暂态稳定问题是指电力系统受到较大的扰动之后，各发电机能否继续保持同步运行的问题。在各种扰动中以短路故障的扰动最为严重。

正常运行时发电机功率特性为： $P_1 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta_1 / X_1$ ；

短路运行时发电机功率特性为： $P_2 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta_2 / X_2$ ；

故障切除发电机功率特性为： $P_3 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta_3 / X_3$ ；

对这三个公式进行比较，我们可以知道决定功率特性发生变化与阻抗和功角特性有关。而系统保持稳定条件是切除故障角 δ_c 小于 δ_{\max} ， δ_{\max} 可由等面积原则计算出来。本实验就是基于此原理，由于不同短路状态下，系统阻抗 X_2 不同，同时切除故障线路不同也使 X_3 不同， δ_{\max} 也不同，使对故障切除的时间要求也不同。

同时，在故障发生时及故障切除通过强励磁增加发电机的电势，使发电机功率特性中 E_0 增加，使 δ_{\max} 增加，相应故障切除的时间也可延长；由于电力系统发生瞬间单相接地故障较多，发生瞬间单相故障时采用自动重合闸，

使系统进入正常工作状态。这二种方法都有利于提高系统的稳定性。

三、实验项目与方法

(一). 单回路稳态非全相运行实验

首先按照稳态对称运行实验中运行方式 1 的线路开关状态进行线路开关的合闸和分闸，调整发电机输出的有功、无功功率与稳态对称运行实验时一致，然后按以下步骤进行实验，比较其运行状态的变化。

操作步骤：

(1)微机保护定值整定：同时按下微机保护装置上的“▲”、“▼”按钮，即会显示出“01-XXX”，通过按下“+”、“-”按钮整定短路保护动作延迟时间为 0.1 秒—显示表示“01-0.10”；通过“▼”按钮当显示切换为“02-XXX”时，通过按下“+”、“-”按钮整定重合闸动作延迟时间为 100 秒—显示表示“02-100.”（*）；

(2)在操作台的故障单元，选择单相故障相（如选择 A 相时，按下“A 相”、“N 相”开关，对应红色指示灯亮）；

(3)在操作台的“短路时间”中，通过旋转其旋钮开关整定短路故障时间为 $0 \text{ 秒} < t < 100 \text{ 秒}$ （*）；

(4)进行单相短路故障（按下故障单元中的“短路”开关），此时微机保护动作切除故障相，准备重合闸，此时只有一回线路的两相在运行。观察此状态下的三相电流、电压值与三相对称运行方式进行比较；

(5)故障发生后重合闸成功，系统恢复到稳态对称运行实验运行方式 1 的状态。

(二) 短路对电力系统暂态稳定的影响

1. 短路类型对暂态稳定的影响

本实验台通过对操作台上的短路选择按钮的组合可进行单相接地短路，两相相间短路，两相接地短路和三相短路试验。

固定短路地点，短路切除时间和系统运行条件，在发电机经双回线与“无穷大”电网联网运行时，某一回线发生某种类型短路，经一定时间切除故障成单回线运行。短路的切除时间在微机保护装置中设定，同时要设定重合闸是否投切。

在手动励磁方式下通过调速器的增(减)速按钮调节发电机向电网的出力，测定不同短路运行时能保持系统稳定时发电机所能输出的最大功率，并进行比较，分析不同故障类型对暂态稳定的影响。将实验结果与理论分析结果进行分析比较。 P_{max} 为系统可以稳定输出的极限，注意观察有功表的读数，当系统出于振荡临界状态时，记录有功表读数，

自动方式开机，建压，并网，待机组运行稳定后，在下面 4 种不同线路组合下做各种短路试验，观察并记录短路发生时的最大有功 P_{max} 。

表 6-1 短路切除时间 $t=0.5s$

线路组合 1: QF1=1 QF2=1 QF3=1 QF4=1 QF5=0 QF6=1:

短路类型	P_{max} (W)
无短路	
单相接地短路	
两相相间短路	
两相接地短路	
三相短路	

(0: 表示对应线路开关断开状态 1: 表示对应线路开关闭合状态)

表 6-2 短路切除时间 $t=0.5s$

线路组合 2: QF1=0 QF2=1 QF3=0 QF4=1 QF5=0 QF6=1:

短路类型	P_{max} (W)
------	---------------

无短路	
单相接地短路	
两相相间短路	
两相接地短路	
三相短路	

表 6-3 短路切除时间 $t=0.5s$

线路组合 3: QF1=1 QF2=1 QF3=0 QF4=1 QF5=1 QF6=1:

短路类型	$P_{max}(W)$
无短路	
单相接地短路	
两相相间短路	
两相接地短路	
三相短路	

表 6-4 短路切除时间 $t=0.5s$

线路组合 4: QF1=0 QF2=1 QF3=1 QF4=1 QF5=1 QF6=1:

短路类型	$P_{max}(W)$
无短路	
单相接地短路	
两相相间短路	
两相接地短路	
三相短路	

(三) 研究提高暂态稳定的措施

1. 强行励磁

在微机励磁方式下短路故障发生后,微机将自动投入强励以提高发电机电势。观察它对提高暂态稳定的作用。

2. 单相重合闸

在电力系统的故障中大多数是送电线路(特别是架空线路)的“瞬时性”

故障,除此之外也有“永久性故障”。

在电力系统中采用重合闸的技术经济效果，主要可归纳如下：

- (1) 提高供电可靠性；
- (2) 提高电力系统并列运行的稳定性；
- (3) 对继电保护误动作而引起的误跳闸，也能起到纠正的作用。

对瞬时性故障，微机保护装置切除故障线路后，经过延时一定时间将自动重合原线路，从而恢复全相供电，提高了故障切除后的功率特性曲线。同样通过对操作台上的短路按钮组合，选择不同的故障相。

通过调速器的增（减）速按钮调节发电机向电网的出力，观察它对提高暂态稳定的作用，观察它对提高暂态稳定的作用。

其故障的切除时间在微机保护装置中进行修改，同时要设定进行重合闸投切，并设定其重合闸时间。其操作步骤同上，不同的是在 05 整定项目时，按压触摸按钮“+”或“-”选择投合闸投切 on，并选 02 整定项目时，按压触摸按钮“+”或“-”设定重合闸动作延时时间。瞬时故障时间由操作台上的短路时间继电器设定，当瞬时故障时间小于保护动作时间时保护不会动作；当瞬时故障时间大于保护动作时间而小于重合闸时间，能保证重合闸成功，当瞬时故障时间大于重合闸时间，重合闸后则认为线路为永久性故障加速跳开整条线路。

表 5-7

整定值代码	01	02	03	04	05	T _D
保护不动作	0.2	1.5	5.00	on	on	0.1
重合闸	0.2	1.5	5.00	on	on	1.0
永久故障	0.2	1.5	5.00	on	on	3.0

注意事项：

1. 在做单相重合闸实验时，进行单相故障操作的时间应该在接触器合闸 10 秒之后进行，否则，在故障发生时跳三相，微机保护装置会显示“GL-xxx”，

且不会进行重合闸操作。

2. 实验结束后，通过励磁装置使无功至零，通过调速器使有功至零，解列之后按下调速器的停机按钮使发电机转速至零。跳开操作台所有开关之后，方可关断操作台上的电源关断开关，并断开其他电源开关。

3. 对失步处理的方法如下：通过励磁调节器增磁按钮，使发电机的电压增大；如系统没处于短路状态，且线路有处于断开状态的，可并入该线路减小系统阻抗；通过调速器的减速按钮减小原动机的输入功率。

四、分析和思考

1. 不同短路状态下对系统阻抗产生影响的机理是什么？
2. 提高电力系统暂态稳定的措施有哪些？
3. 对失步处理的方法（注意事项 3 中提到）的理论根据是什么？
4. 自动重合闸装置对系统暂态稳定的影响是什么？

第六章 PSCAD/EMTDC 软件介绍

一、概述

PSCAD/EMTDC 是加拿大马尼托巴高压直流研究中心（Manitoba HVDC Research Center）推出的一款电力系统电磁暂态仿真软件。其中 EMTDC 是仿真计算的核心，PSCAD 是 EMTDC 的前置处理程序。

用户可以在 PSCAD 用户界面的面板上构造电气连接图，设置元件参数，通过 Fortran 进行编译、连接，运行结果可伴随着程序运行的进度以曲线的形式反映在图表上。除了自带的元件库，PSCAD 还提供强大的用户自定义建模功能，用户可以根据需要创建具有特定功能的逻辑运算模块和装置。PSCAD 因其直观易用的软件界面和精确高效的仿真结果成为世界上主流的电磁暂态仿真软件之一。

以下是经常应用 PSCAD 进行的研究案例：

- 一般的交流电力系统电磁暂态分析
- 继电保护配合
- 绝缘配合
- 变压器饱和
- 变压器的脉冲测试
- 雷击、故障或断路器动作
- 含有旋转电动机、励磁机、调速器、变压器、架空输电线、电缆以及负荷的交流电网络的事故研究
- FACTS 和 HVDC 控制系统的设计及配合
- 滤波器设计和谐波分析
- 陡波前或快波前分析
- 太阳能光伏发电、风力发电对电气网络的影响

本实验课程锻炼学生熟练掌握 PSCAD 软件，一方面可以在有限的实验条件下更直观、形象地描述电力系统相关概念，另一方面将理论计算和虚拟仿真结合起来，提高学生处理电力系统问题的综合能力。

二、主要设置与基本操作

1、PSCAD 的主工作界面

PSCAD 工作环境的主界面如图 6-1 所示。

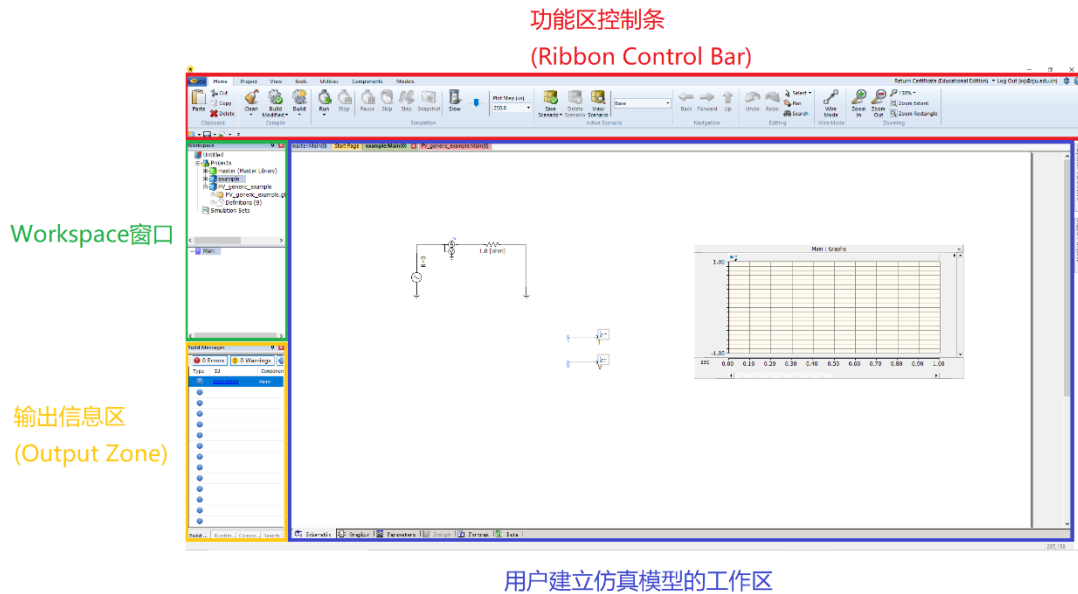



图 6-1

整个工作环境主界面可分为 4 个主要区域：顶端为功能区控制条（Ribbon Control Bar）；左边中部的 Workplace 窗口；左边底部的输出信息区（Output Zone）；其余部分为用户建立仿真模型的工作区。

1.1 功能区控制条（Ribbon Control Bar）

功能区控制条根据标签窗口的需要将大部分 PSCAD 功能分门别类，为用户提供了快速便捷的访问手段。当用户选择不同标签窗口时，功能区控制条的内容可能会随之改变。

PSCAD Tab: 该菜单  在文件的左上角，包括新建、打开、保存、卸载和打印等多项基本功能。在该菜单内还可快速打开最近访问过的文件。见图 6-2。

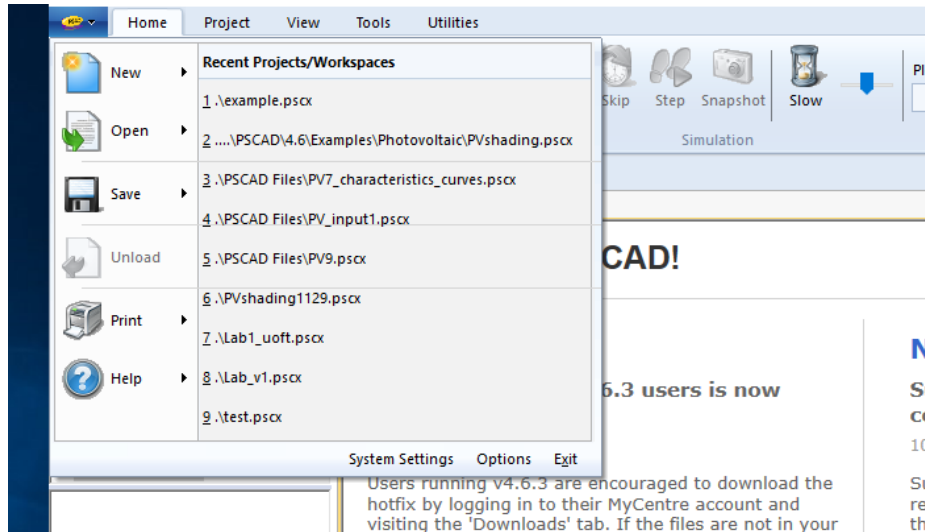


图 6-2

Home: 包含了剪切板、编译、仿真、方案、浏览、编辑操作、绘制连接线和缩放功能等常用特性。见图 6-3。

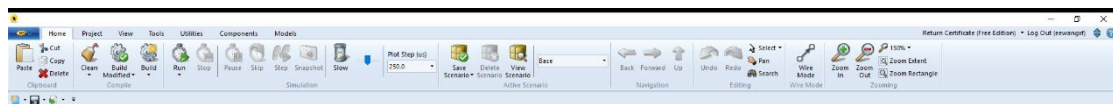


图 6-3

Project: 包含了 Project Settings 的快捷访问, 比如运行过程设置 (Runtime Settings)。见图 6-4。

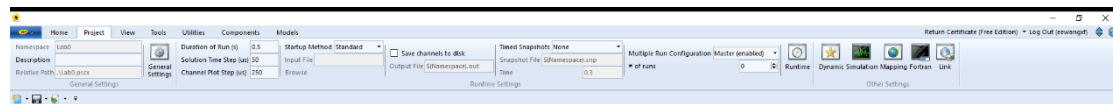


图 6-4

View: 包含了窗口控制、页面设置以及度组建画布设置 (Canvas Settings) 的快捷访问。见图 6-5。

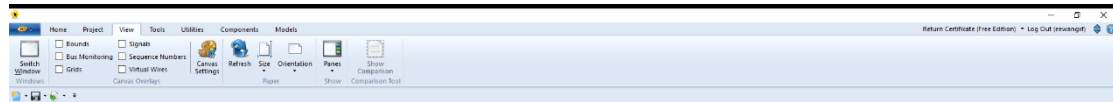


图 6-5

Tools: 包含了比较工具。见图 6-6。

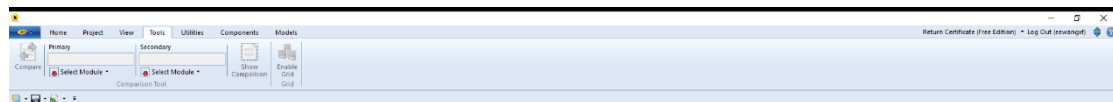


图 6-6

Utilities: 提供了附加的检测、应用程序。见图 6-7。

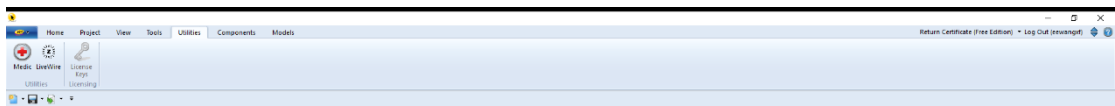


图 6-7

Components: 以直观的形式提供了对主元件库内最常用元件的快捷调用方式。见图 6-8。

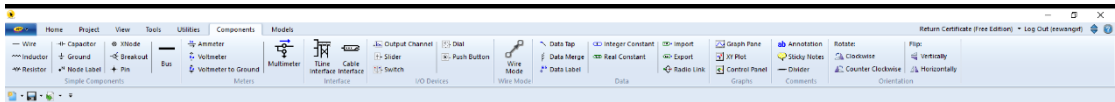


图 6-8

Models: 提供了对主元件库内除输电线路/电缆以外所有元件的快捷调用方式。元件分组按英文字母排序，与主元件库页面内的图形化分组一致。见图 6-9。

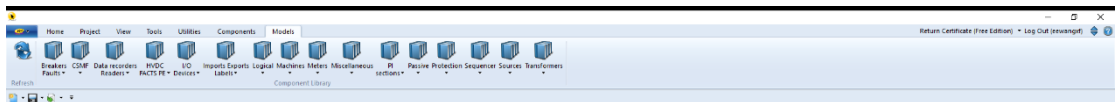


图 6-9

Shapes: 用于处理定义编译器 Graphics 部分的图形对象。见图 6-10。

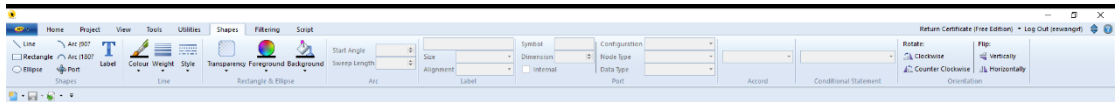


图 6-10

Filtering: 用于处理图形层。见图 6-11。

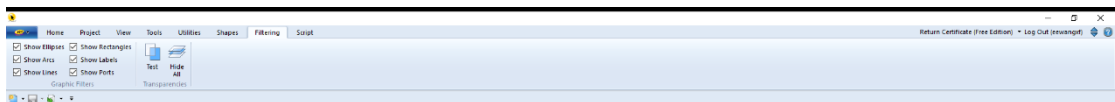


图 6-11

Script: 用于处理元件代码。见图 6-12。

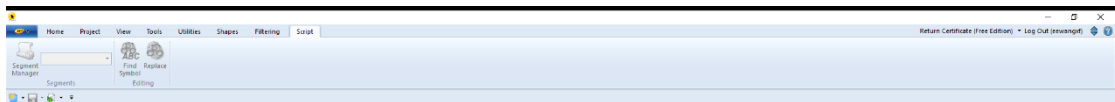




图 6-12

1.2 Workplace 窗口

Workplace 工作区分为上下两个窗口，见图 6-13。上面的窗口（第一窗口）包含了已加载项目的列表。例如，图中加载了主文件库 **master (Master Library)**、**example** 和 **PV_generic_example**。下面的窗口（第

二窗口)显示与上面的窗口所选择项目的相关信息。例如,在第一窗口选取 PV_generic_example 项目后,第二窗口出现了该项目的浏览器结构:包含 VSC、DC-DC-Bi 和 Load 三个子模块,其中 VSC 子模块又 LCL_Filter 和 Rectifier_Controls 两个子模块,DC-DC-Bi 又包含 PIwithFreeze 子模块。用户可以通过点击加号  和减号  来展开、隐藏子模块。

每个 Workplace 由 Projects 和 Simulation Sets 两部分构成。Projects 列出了加载的 case 和 library 项目。主元件库默认作为第一个项目加载到 Projects 列表。Simulation Sets 包含了需要进行仿真的任务列表。用户可以通过按顺序点击 PSCAD Tab -> New 菜单来创建新的 Workplace、Case 和 Library,扩展名分别为 .pswx、.pscx 和 .pslx。

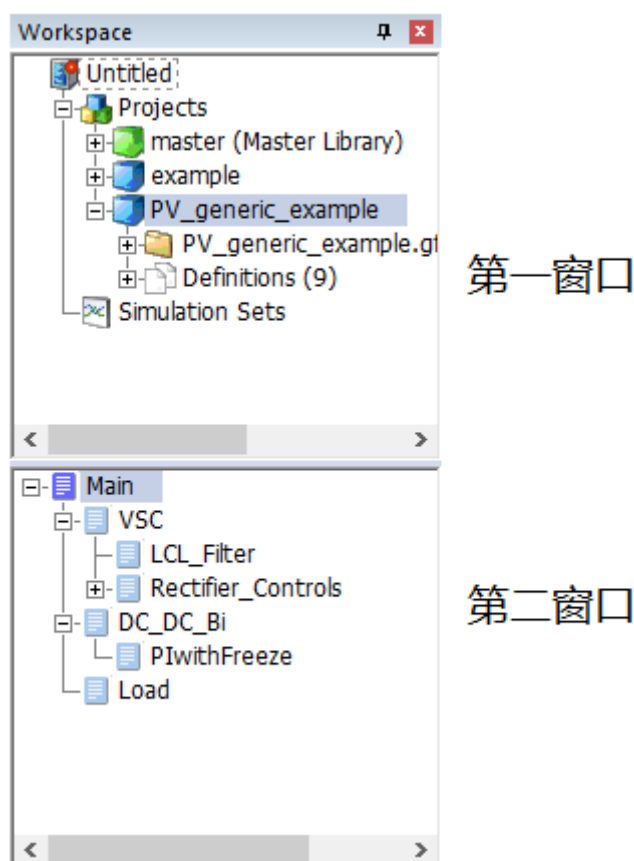


图 6-13

1.3 输出信息区 (Output Zone)

输出信息区主要由 Build Messages、Runtime Messages、Component Wizard 和 Search 窗口组成,如图 6-14 所示。其中, Build Messages 和 Runtime Messages 提供查看仿真反馈消息的界面,帮助用户对项目进行调试。由元件、PSCAD 或 EMTDC 产

生的所有消息，包括运行过程信息、警告信息和错误信息均可在这两个窗口内查看。

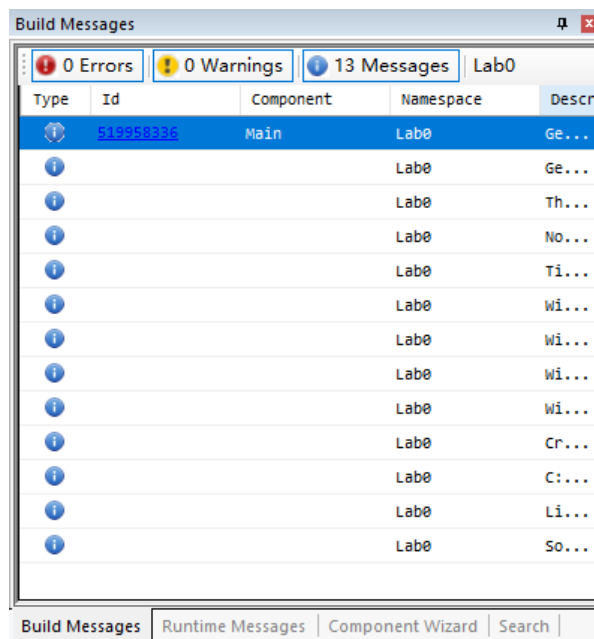


图 6-14

Build Messages: 提供的反馈消息源自对项目的 Fortran、data 和 map 文件进行编译的过程，该窗口如图 6-15 所示。产生的消息类型包括运行过程信息、警告信息和错误信息，如图 6-16 所示。消息类型可以根据图标颜色进行区分。

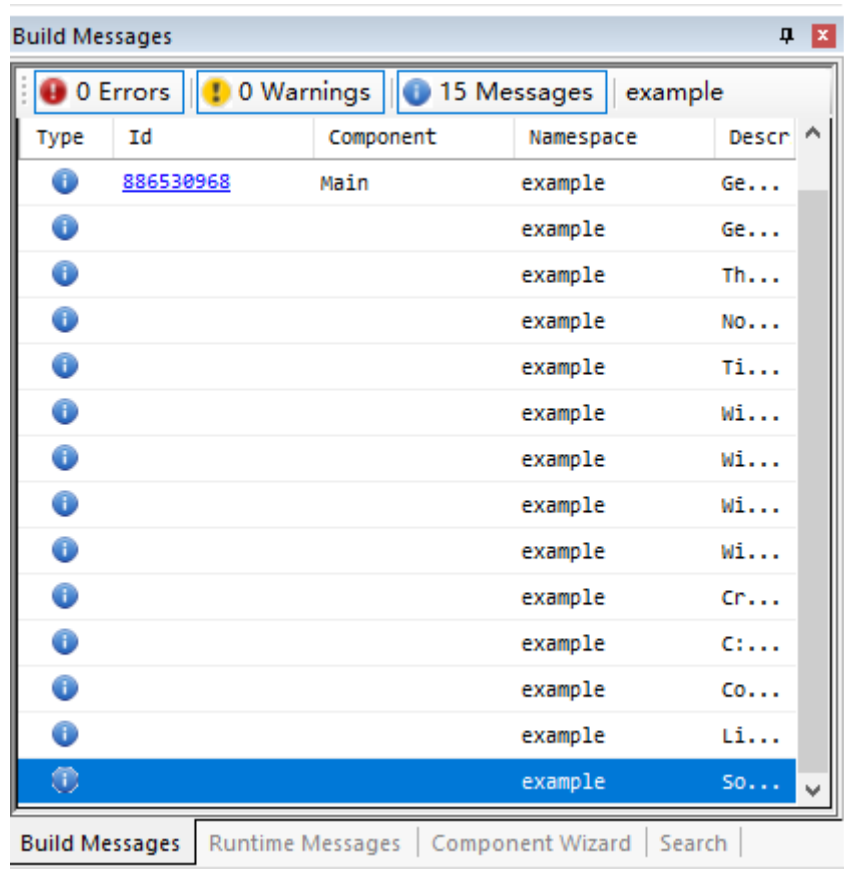


图 6-15

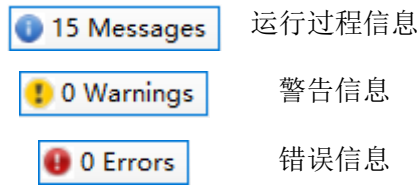


图 6-16

运行过程信息展示了调用、编译、关联等步骤和编译、运行时间等数据。警告信息不会对仿真过程产生致命影响，PSCAD 会忽略所有警告信息并继续对该项目进行编译和运行。但是，警告信息表明系统的部分区域可能会影响仿真结果。因此，用户也应当尽量处理警告信息。错误信息将会终止整个仿真过程。因此，用户需要仔细研究错误信息，并及时改正错误信息。用鼠标点击任意一条错误信息可以对该错误信息进行定位和查看。例如，如果没有在万用表上对需要测量的信号进行设置时，会产生图 6-17 所示的错误信息。用鼠标单击蓝色链接，PSCAD 将在该错误信息的位置给出图 6-18 所示的提示，帮助用户进行改正。

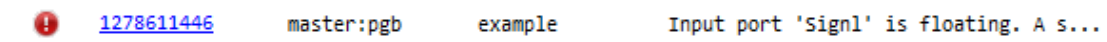


图 6-17

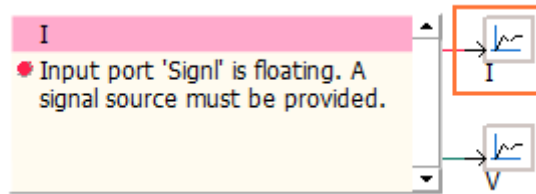


图 6-18

Runtime Messages: 提供的仿真反馈消息源自 EMDTC 的仿真过程。见图 6-19。

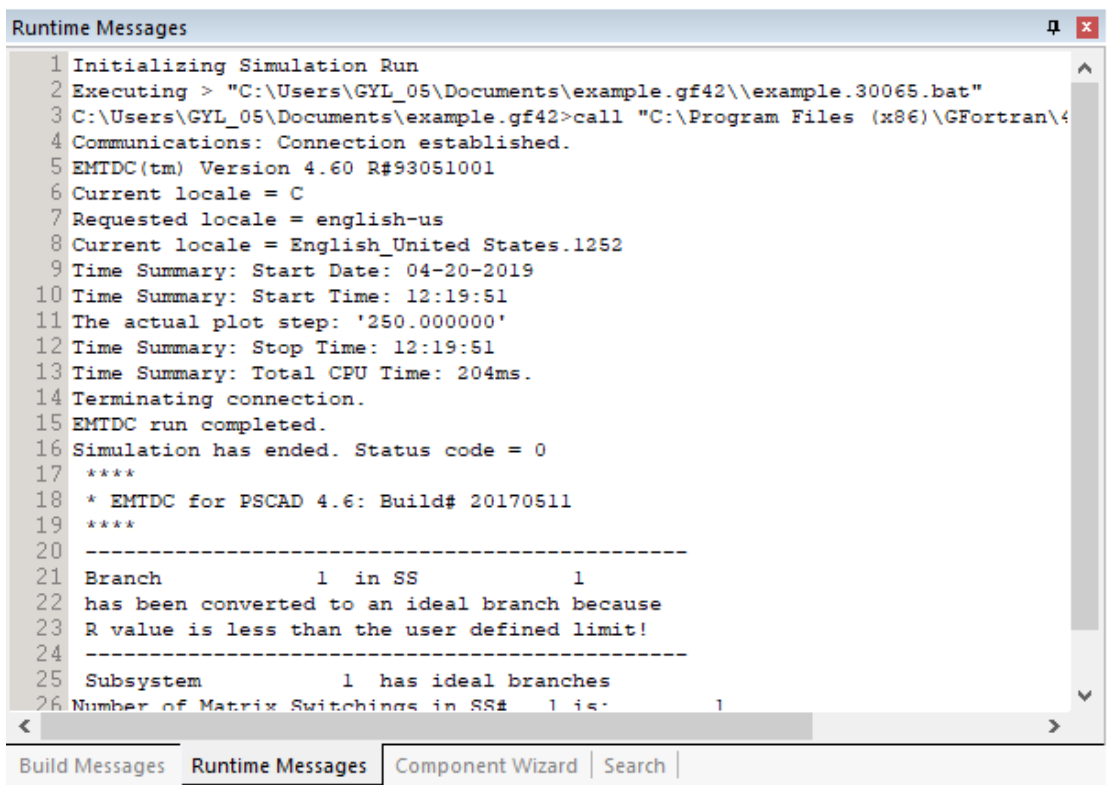


图 6-19

Component Wizard: 提供构建模块和输电线路/电缆的快捷方式。见图 6-20。

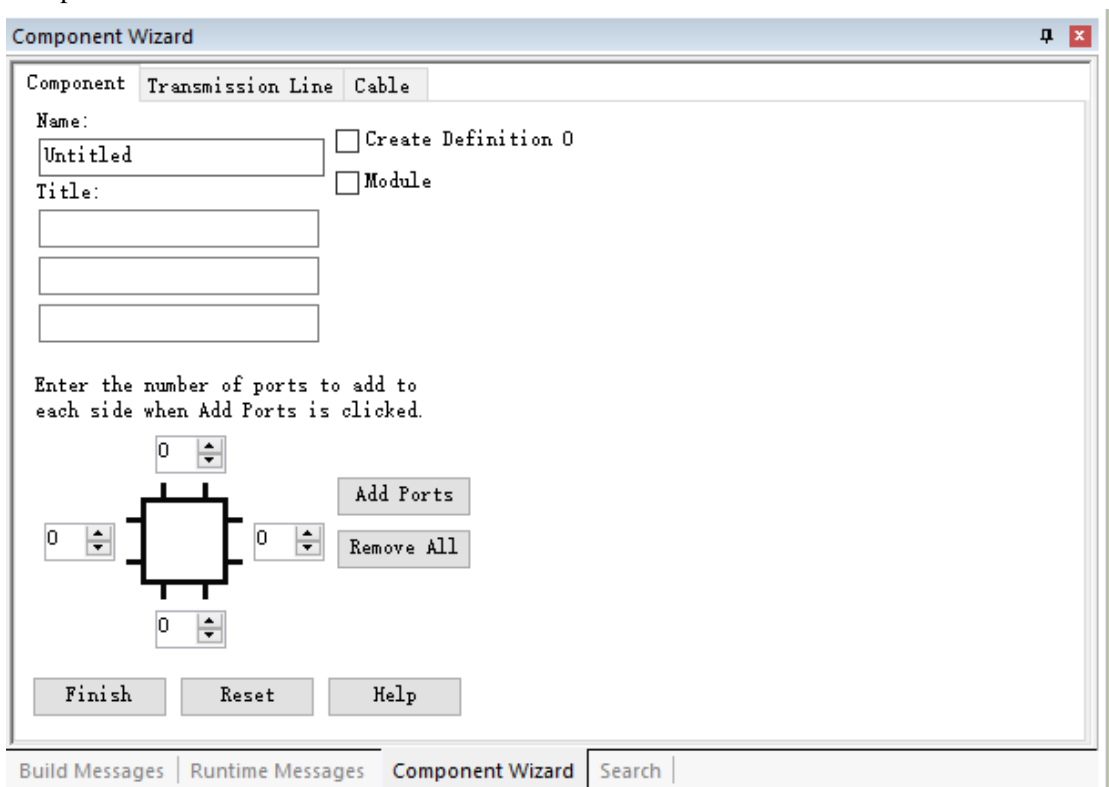


图 6-20

Search: 提供查找和替换功能。见图 6-21。

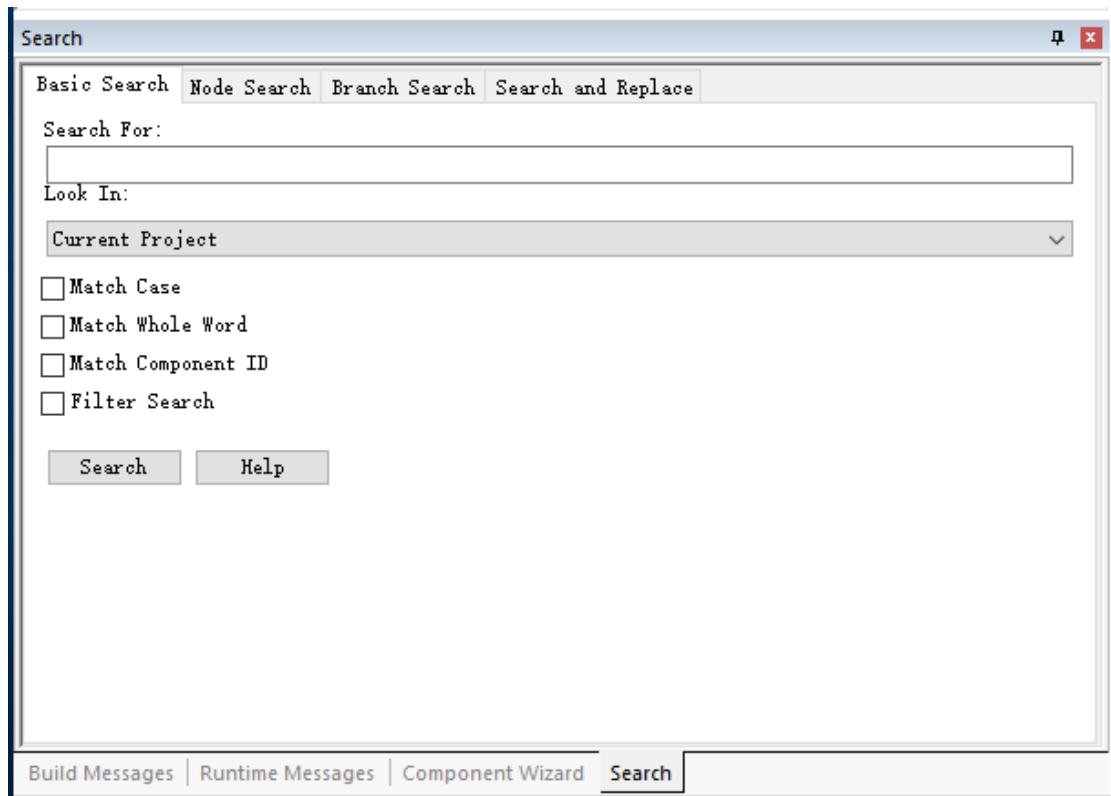


图 6-21

1.4 工作区

工作区是用户设计仿真模型的主要区域，如图 6-22 所示，包括以下六个标签窗口：

Schematic: 用于构建所有的电气网络。

Graphic: 用于编辑元件或模块的图形外观。

Parameters: 用于编辑元件定义的参数。

Script: 用于编辑元件定义的代码。

Fortran: 用于查看与当前模块定义相关的 Fortran 文件。

Data: 用于查看与当前模块中任何电气网络相关的 EMTDC 输入数据。

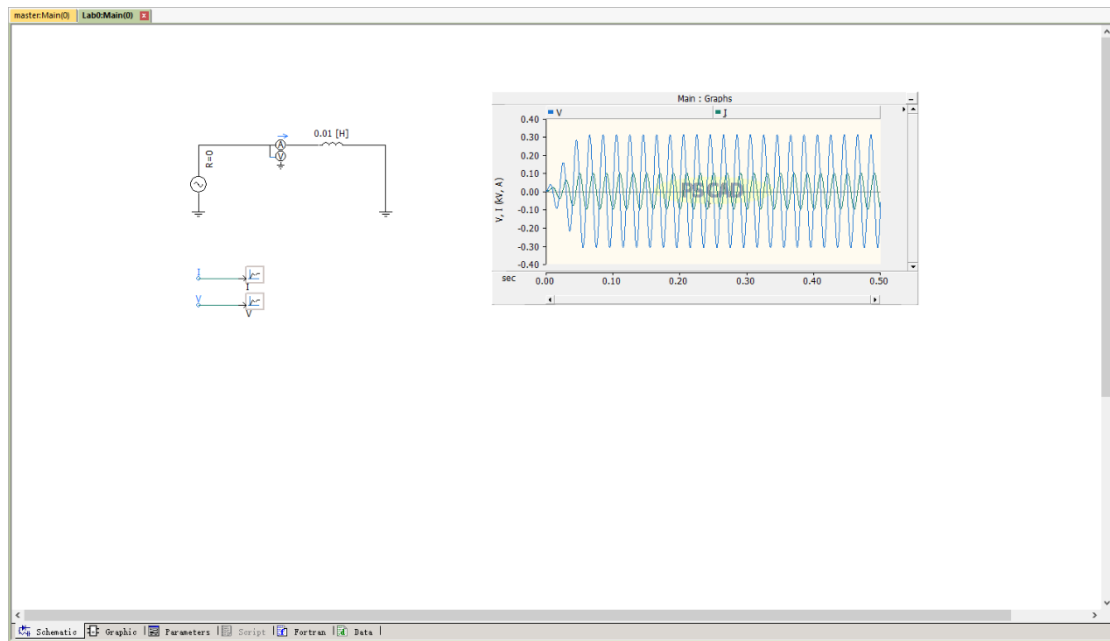


图 6-22

2、仿真流程

用户使用 PSCAD 进行电力系统仿真的主要流程如图 6-23 所示。

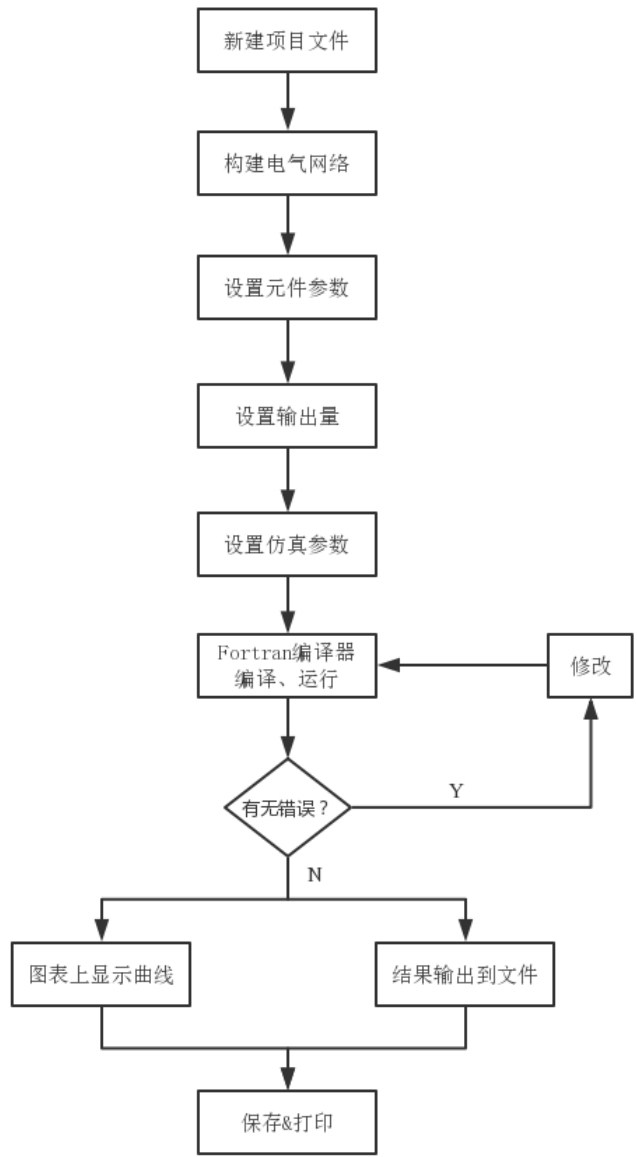


图 6-23

下面以图 6-24 给出的电路原理图为例，按照上述流程进行仿真。仿真任务为绘制电路的电压、电流波形图。

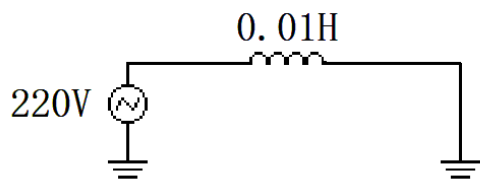




图 6-24

2.1 新建项目文件

PSCAD 的图标为 ，双击图标启动软件，通过按顺序点击界面左上角 PSCAD Tab  -> New -> New Case 菜单（见图 6-25）来创建新的 case 文件，在弹出的保存文件对话框中填好文件名和保存路径，点击保存（见图 1-26）。文件名和保存路径不要出现中文字符。

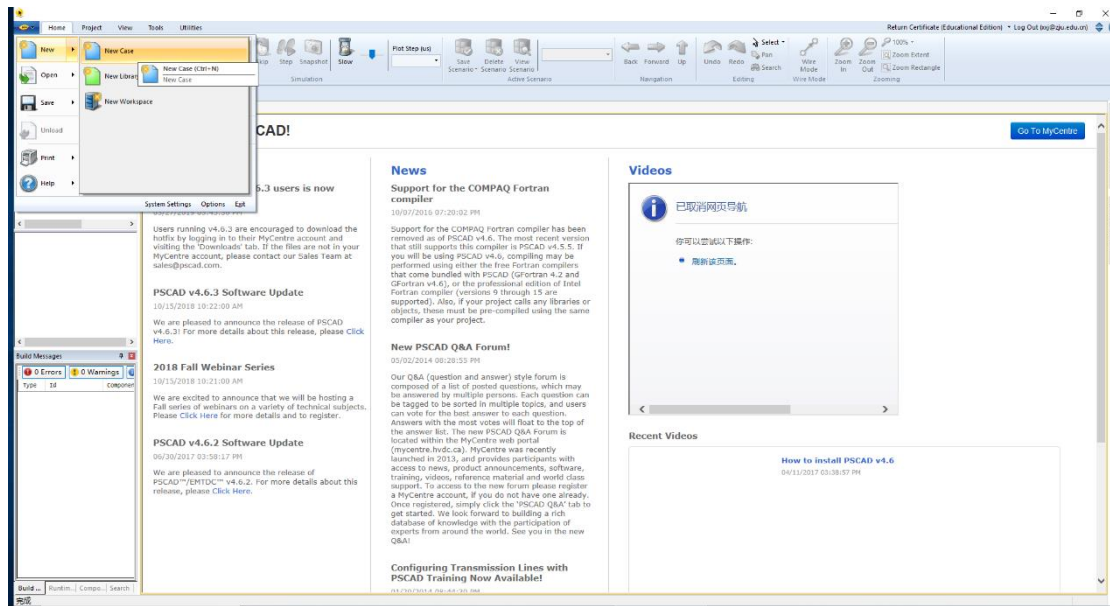


图 6-25

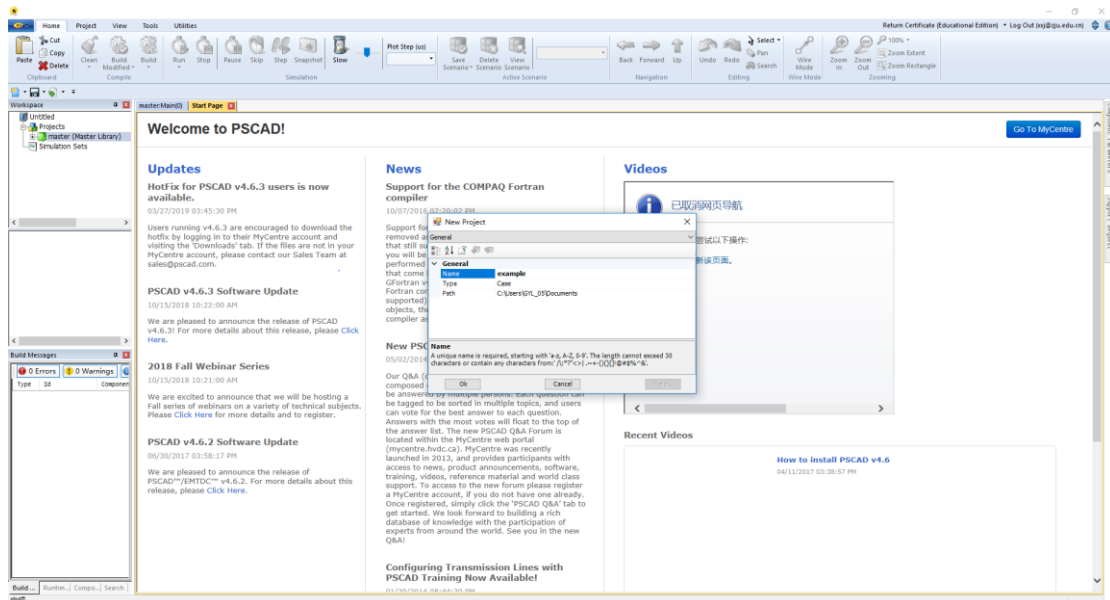


图 6-26

2.2 构建电气连接图

电气连接图需要画在 Schematic 工作区，分为添加元件和连线两个步骤。

首先，介绍添加元件到 Schematic 工作区的方法。

本例需要的元件有单相电压源（Single Phase Voltage Source Model 2）、万用表、电感和接地，见图 6-27。

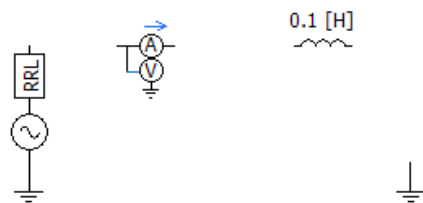


图 6-27

常见的元件添加方式有以下几种：

1) 打开主元件库找到所需元件后，复制到工作区。

主元件库将元件分门别类，方便用户根据类别找到所需元件。主元件库包含了以下类型的元件：

- Passive Elements: 无源元件
- Sources: 电源
- Miscellaneous: 其他元件
- I/O Devices: I/O 设备
- Breakers & Faults: 断路器和故障模型
- HVDC, FACTS & Power Electronics: 高压直流输电、柔性输电系统和电力电子模型
- Imports, Exports & Labels: 输入、输出和标签
- Transformers: 变压器
- Machines: 电动机
- CSMF: 控制模块和计算模块
- Transmission lines: 输电线路
- Cables: 电缆
- Meters: 仪表
- Protection: 继电器和继电保护单元

- External Data Recorders & Readers:
- Sequencers: 顺序动作元件
- Logical: 逻辑电路元件
- PI Sections: 输电线的 II 型等值电路

点击 Workplace 窗口的主元件库项目，工作区就会显示图形化分组的元件，如图 6-28 所示。

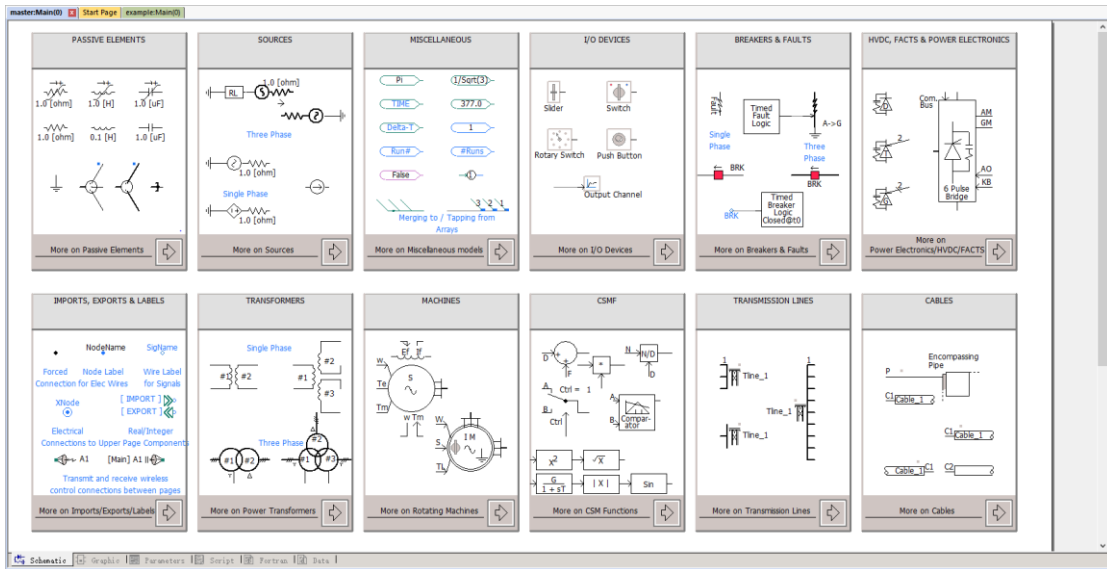


图 6-28

添加单相电压源 (Single Phase Voltage Source Model 2) 时，可以点击 SOURCES 类别组右下角的箭头打开该类别组的元件库。

图 6-29 是 SOURCES 类别组的展开图。

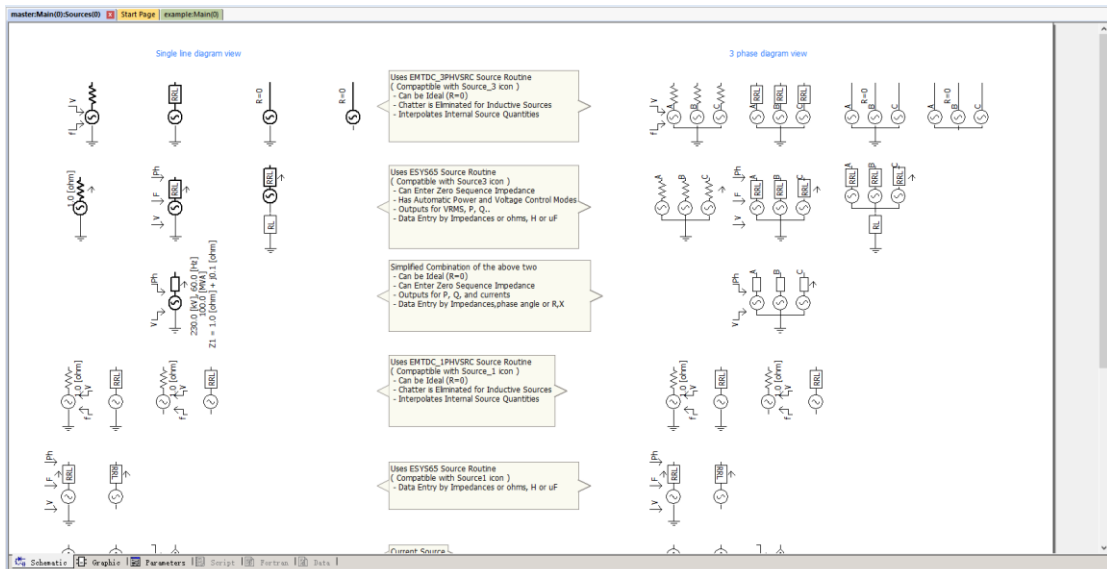


图 6-29

其中，左半部分为单相等效电路表示法，右半部分为三相表示法。用户可根据实际需要选取其中一种表示法。比如，搭建三相电路的单相短路实验时，选用三相表示法。两种表示法也可以在元件属性对话框进行互换。为了区分单相等效电路表示的三相元件和真正的单相元件，单相等效电路表示的三相元件线路加粗。因此，在选取元件时，一定要确保选择正确的相数。本例中选取左半部分第四行第二个元件，用鼠标右键单击该元件，从弹出的菜单中选择 Copy，或者选中该元件后按 Ctrl+C；在 Schematics 工作区的目标位置单击鼠标右键，从弹出的菜单中选择 Paste，或者直接用 Ctrl+V 把元件复制过去。

注意：一定要先把元件从主元件库复制到 Schematics 工作区以后，再修改元件副本的参数，禁止直接在元件库里修改元件参数。

- 2) 在功能区控制条的 Components 选项卡浏览所需元件后直接添加到工作区。

Components 选项卡（见图 6-30）包含了最常用的元件，在需要的元件上单击左键并移动到 Schematics 工作区的目标位置，再次单击左键即可添加该元件。



图 6-30

- 3) 在功能区控制条的 Models 选项卡浏览所需元件后直接添加到工作区。

Models 选项卡（见图 6-31）对元件分门别类，并和主元件库相呼应。在相应的类别组中左键单击下拉箭头，选择所需元件单击鼠标左键，并移动到 Schematics 工作区的目标位置，再次单击左键即可添加该元件。

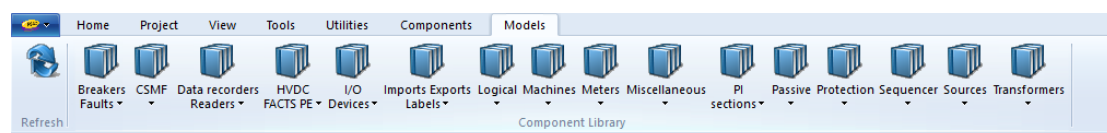


图 6-31

- 4) 在工作区空白处单击鼠标右键，在下拉菜单中选择 Add Component，在子菜单中浏览所需元件后直接添加到工作区（见图 6-32）。

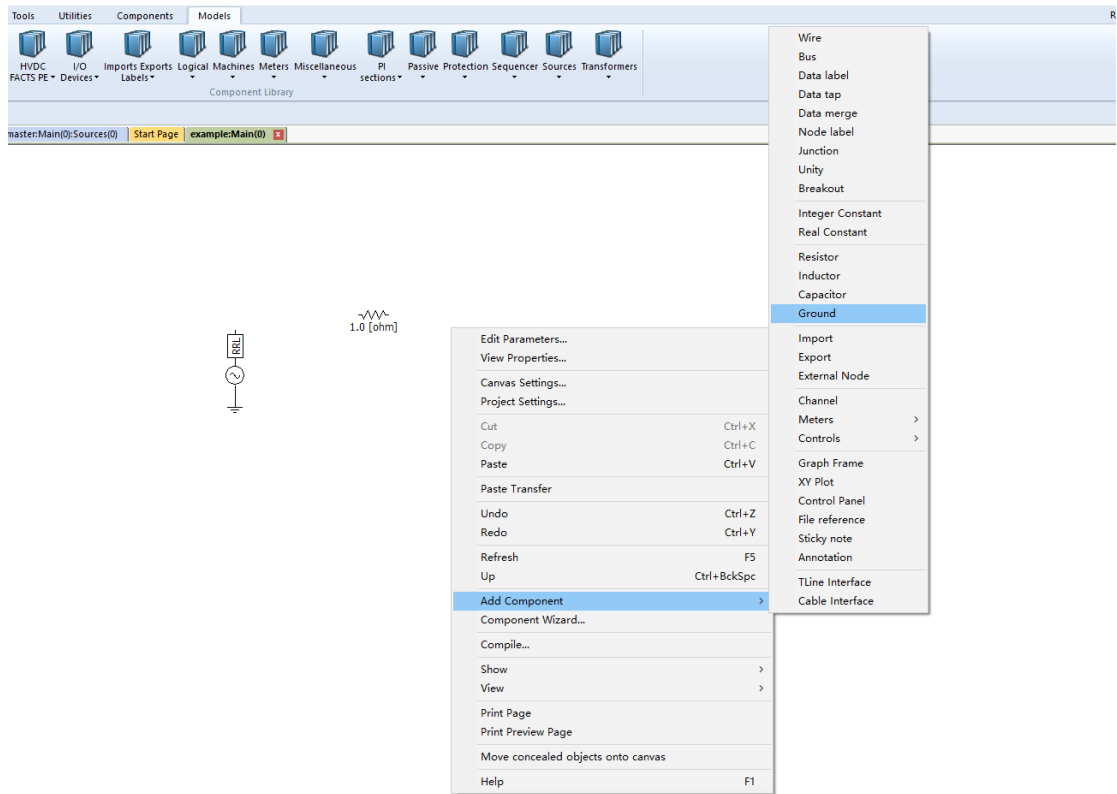


图 6-32

5) 直接复制工作区内已经存在的元件。

如果需要改变元件方向，可以单击元件后按 **Ctrl+R** 顺时针旋转该元件，或者单击元件后在 **Components** 选项卡的 **Orientation** 组别（见图 6-33）旋转或翻转该元件。

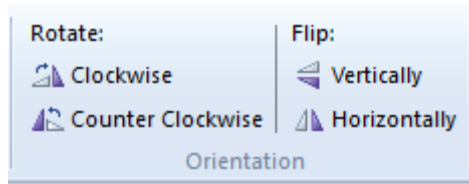



图 6-33

然后，将元件按照原理图正确地连接起来。点击 **Wire Mode** 按钮  可以发现鼠标在工作区变成铅笔状。在一侧连接点上点击左键，移动鼠标到另一连接点，点击右键完成一次连线。在一侧连接点上点击左键后，移动鼠标再次点击左键可以对线路转向九十度。全部连接完成后，按 **Esc** 退出连线模式。连接后如图 6-34 所示。

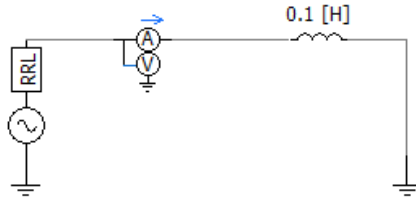


图 6-34

在 PSCAD 中，连接线遵循以下规则：

- 两条线路相连，必须至少有一个端点或交点相接触；
- 交叉的线路不是相连的，如需相连必须添加 Pin 元件。

例：



图 6-35 相连的线路



图 6-36 不相连的线路

2.3 设置元件参数

电源参数：理想电源，220V，50Hz，相角 0 度，其余用默认参数。双击电源元件，在弹出的对话框内按图 6-37 设置，需注意参数的默认单位。

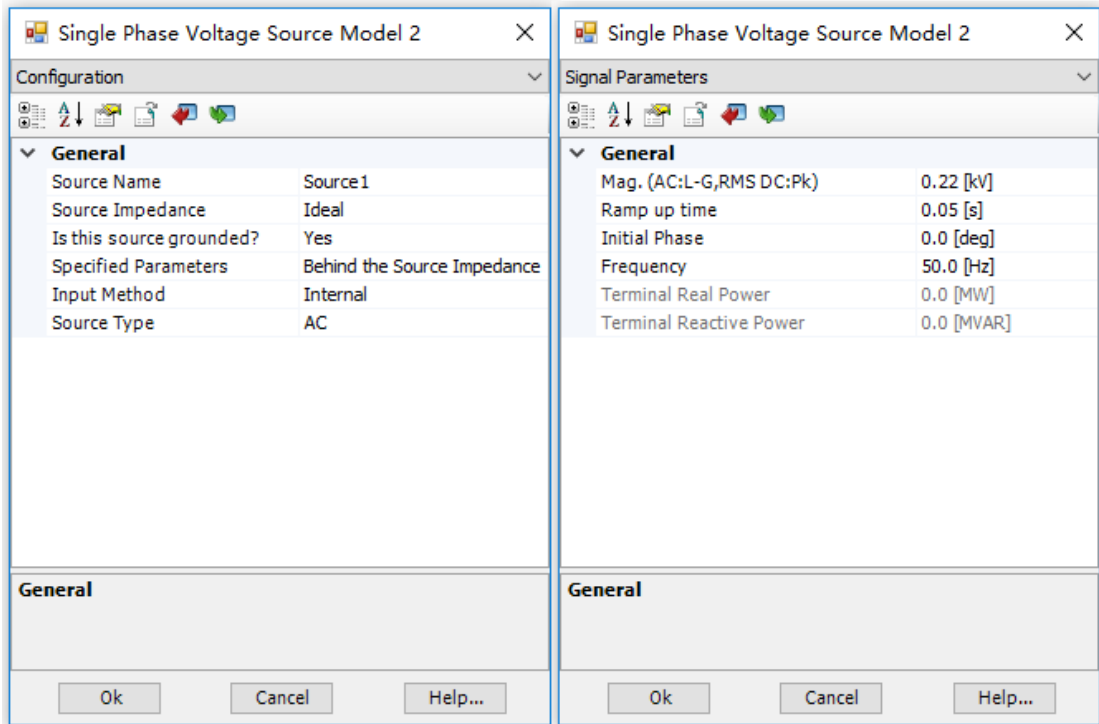


图 6-37

电感参数：0.01H。用鼠标双击电感元件，在弹出的对话框内按图 6-38 设置。

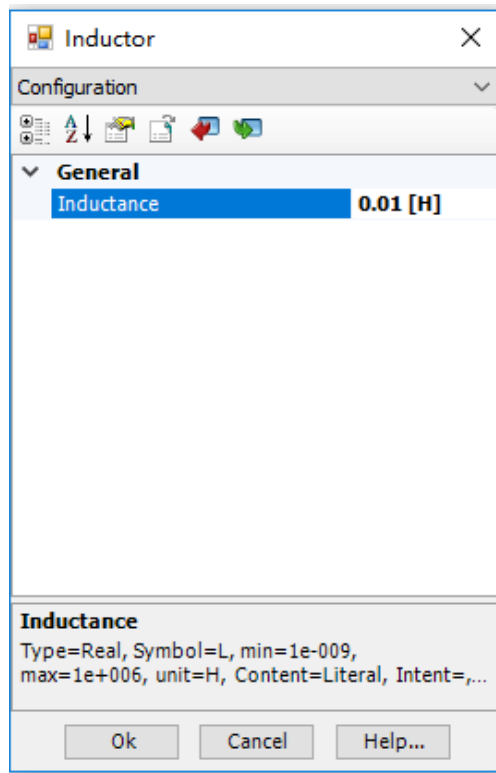


图 6-38

2.4 设置输出量

本例使用万用表测量线路上的瞬时电压和瞬时电流，将波形绘制在图表上。

首先，按照图 6-39，设置万用表的参数。双击万用表，选择 Configuration 窗口，将 Measurement 菜单中的 Instantaneous Voltage? 和 Instantaneous Current? 选项选择 Yes，表示需要测量这两个信号。选择 Signal Name 窗口，Instantaneous Current 和 Instantaneous Voltage 选项变为黑色可填，分别将信号命名为 I 和 V。

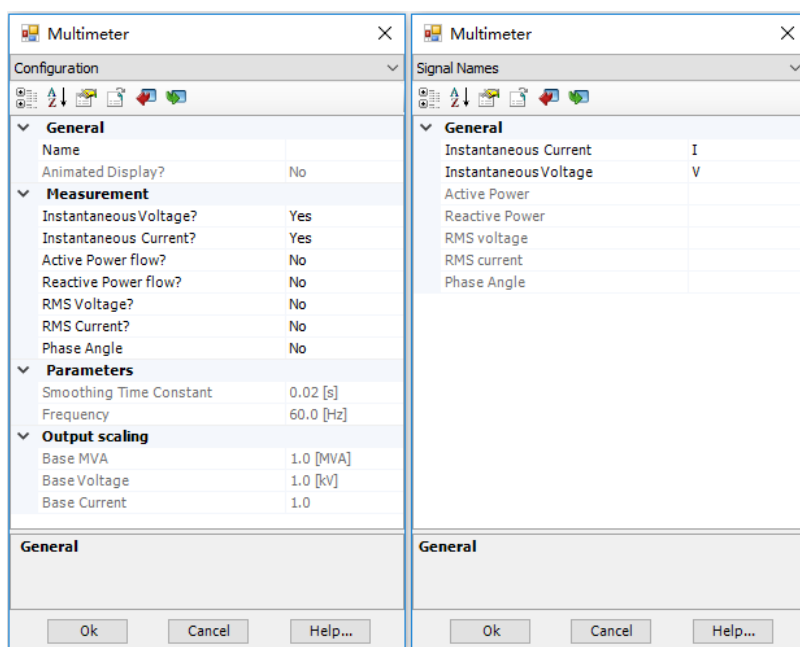
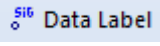
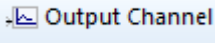


图 6-39

然后，用信号标签  Data Label 将测量信号连接到输出通道（Output Channel），见图 6-40。

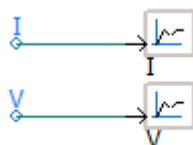


图 6-40

于是，工作区如图 6-41 所示。

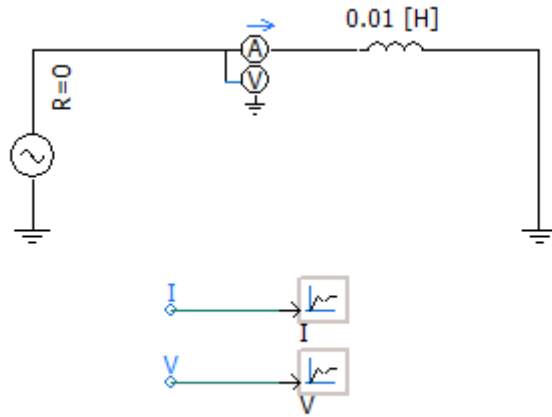


图 6-41

下面，我们对输出通道的参数进行设置，如图 6-42 所示。将 Configuration 菜单中的 Use signal name as title? 选项选择 Yes，表示输出通道的信号名称与输入的信号相同，系统运行后输出通道将和输入的信号同名。我们也可以对另外对输出通道的信号命名。Scale Factor 是比例系数，可以将输入信号成比例放大或缩小。

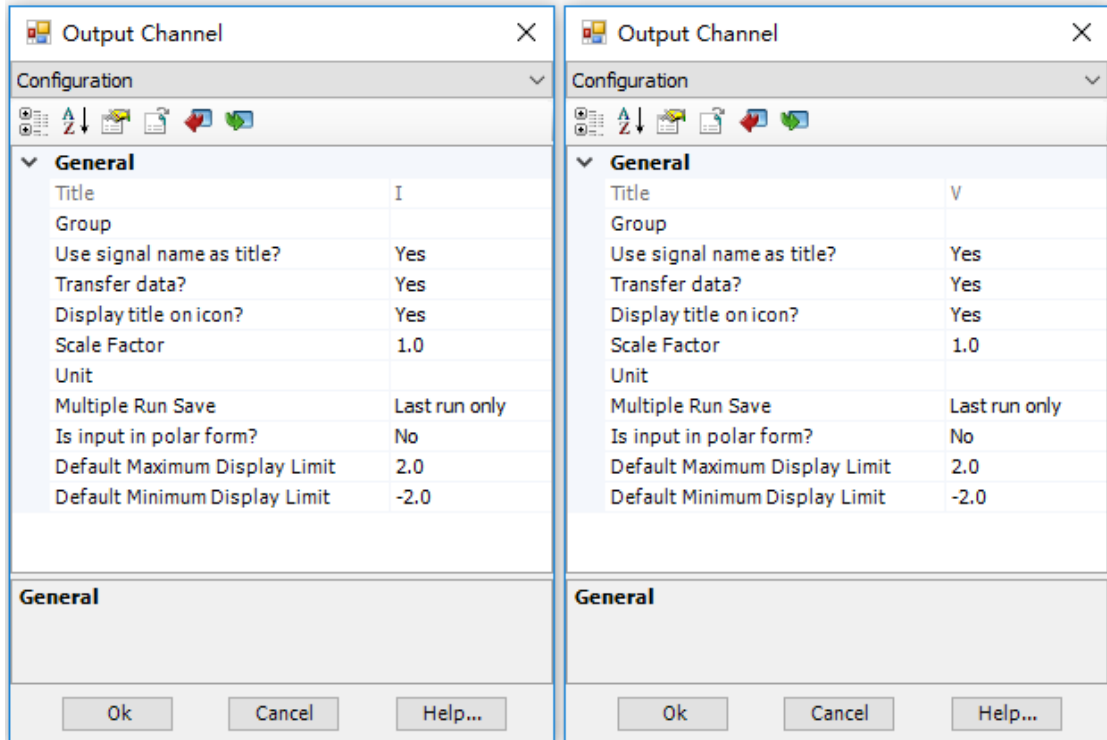


图 6-42

最后，添加绘制测量信号的图表。图表专用于绘制以时间为变量的曲线，有 Overlay 和 PolyGraph 两种形式。

以 Overlay 图表为例，在连接电流 I 的输出通道上点击右键，在下拉菜单中选择 Graphs/Meters/Controls，在子菜单中选择 Add Overlay Graph with Signal（见图 6-43），于是出现图 6-44 所示的图表，上端显示 I，可双击图表设置格式。

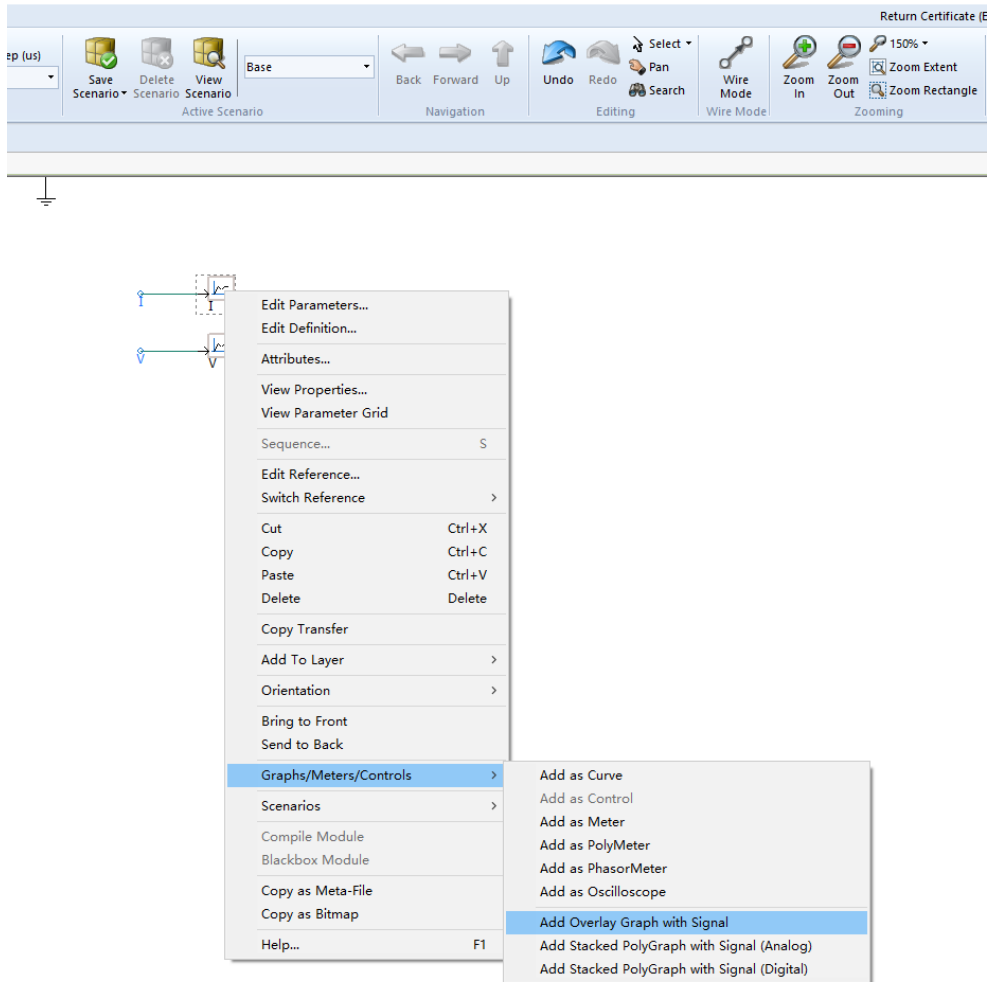


图 6-43

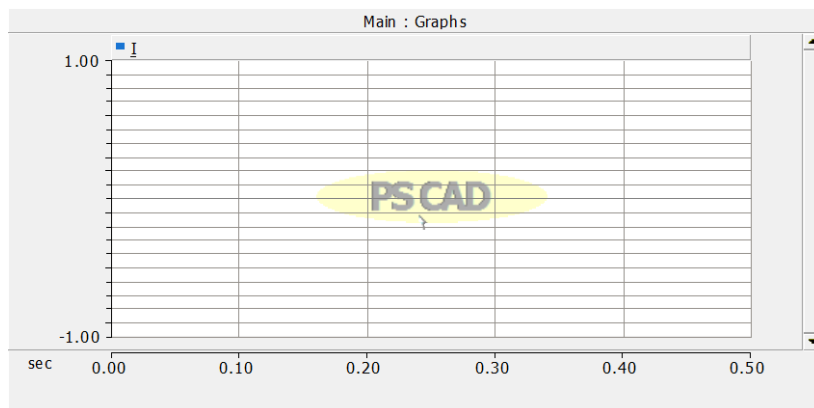


图 6-44

本例需要将 I 和 V 信号绘制在同一张图表上。可以通过以下两种方式将 V 的波形添加到图 6-44 上：

- 1) 按住 Ctrl 键，选择连接电压 V 的输出通道拖拽到图表上。
- 2) 在连接电压 V 的输出通道上点击右键，在下拉菜单中选择 Graphs/Meters/Controls，在子菜单中选择 Add as Curve，见图 6-45。在图表内部区域点击右键，在下拉菜单中选择 Paste Curve 添加，见图 6-46。

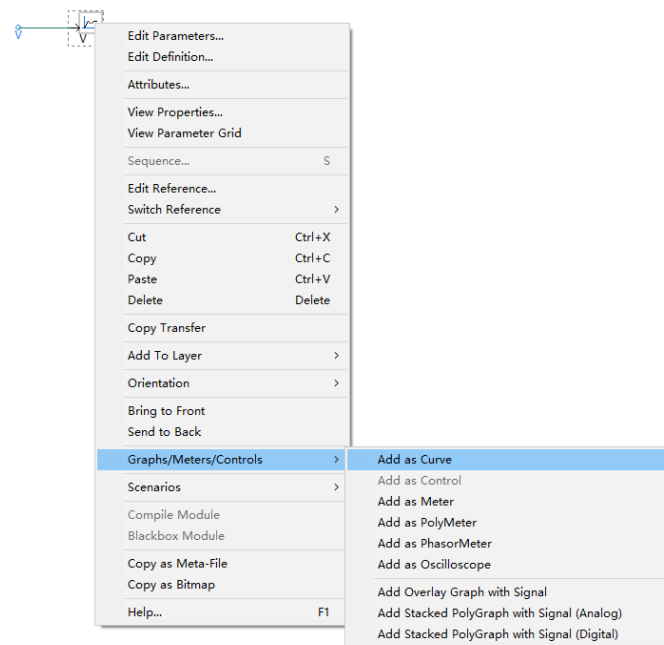


图 6-45

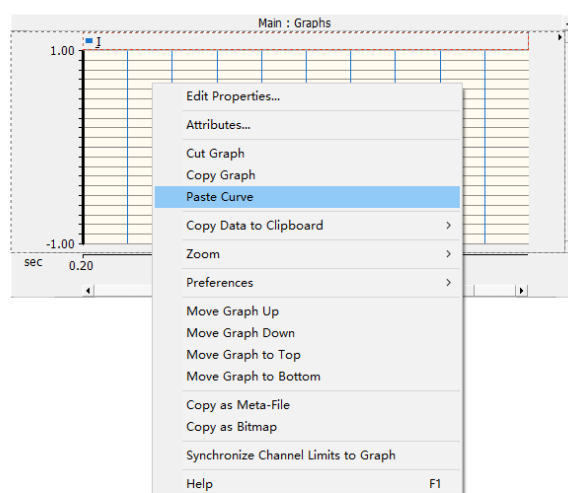


图 6-46

注意：纵坐标一定要写清楚信号名称和单位。用鼠标双击纵坐标区域，在弹出的窗口设置图表参数，如图 6-47 所示。

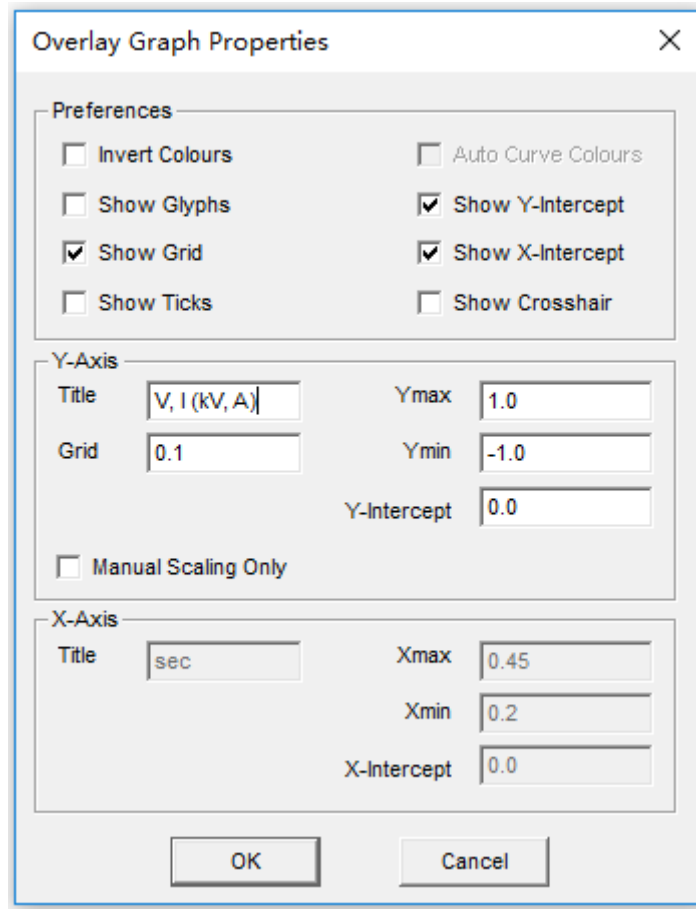


图 6-47

如果 Schematics 工作区的画布面积不够，可以在 View 选项卡单击 Size 下拉菜单，选择更大的画布，如图 6-48 所示。在本实验中，保持默认的 A/A4 尺寸即可。

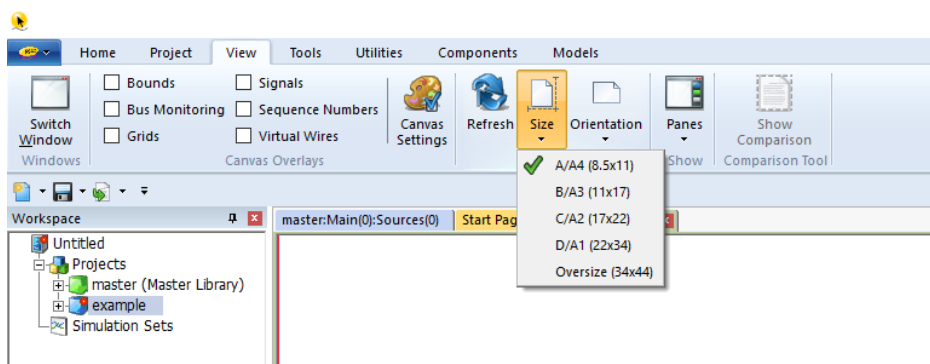


图 6-48

2.5 设置仿真参数

在功能区控制条的 Project 选项卡设置仿真参数。图 6-49 为默认的仿真时间设置，包括以下几个参数：

Duration of Run (s)：以秒为单位的仿真总时长。




Solution Time Step (μs)：以微秒为单位的仿真步长。

Channel Plot Step (μs)：以微秒为单位，表示 EMTDC 向 PSCAD 发送用于绘图的数据，以及输出数据写到文件时间间隔。

Duration of Run (s)	0.5
Solution Time Step (μs)	50
Channel Plot Step (μs)	250

图 6-49

2.6 Fortran 编译器编译、运行

以上步骤全部完成后，点击编译按钮  进行编译。如果有错误，可通过输出信息区的  菜单定位错误位置，修改后重新编译。重复此步骤直到没有错误，点击运行按钮  分析波形。本例的波形如图 6-50 所示。

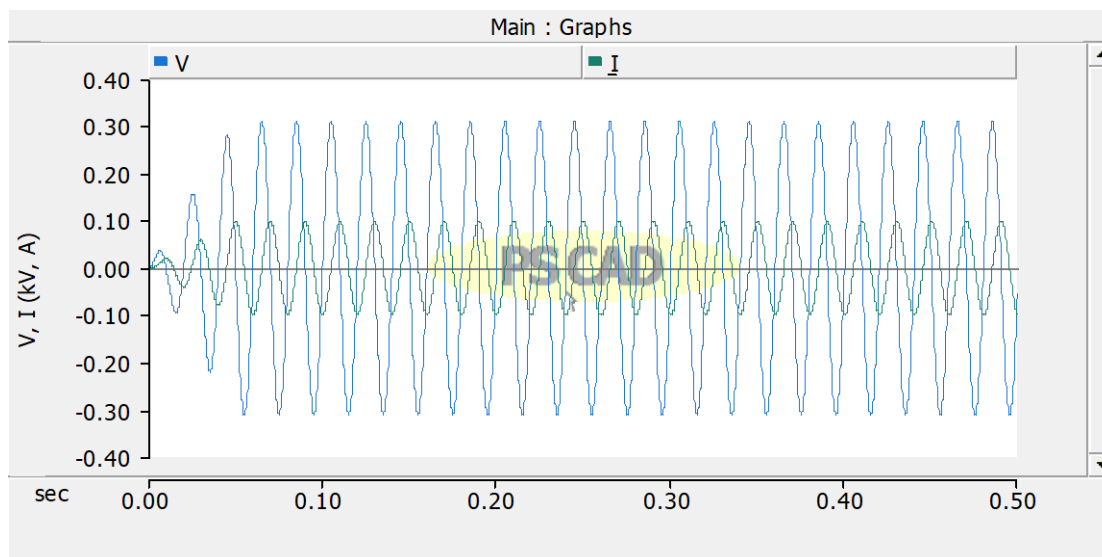


图 6-50

2.7 保存&打印

用户需要将 PSCAD 中的图表复制到 Word 中时，用鼠标选中所需图表，然后点击右键，在下拉菜单中选择 Copy as Meta-File 或 Copy as Bitmap（见图 6-51），再按 Ctrl+V 粘贴到 Word 文档即可。

用户只需要用鼠标框住需要放大的区域，就能局部放大。按 Shift+R 可以返回默认的图表大小。

注意：鼠标选中图表时，一定要点击最外面的框，保证将横、纵坐标等信息一起复制过去。

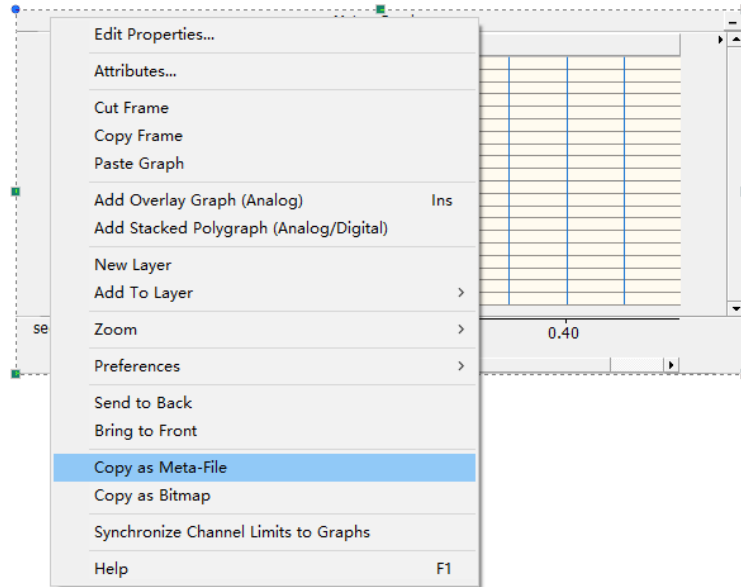


图 6-51

在功能区控制条的 Project 选项卡设置仿真数据存储路径。勾选 Save channels to disk。默认将数据保存在与 case 文件同路径的同名文件夹下以 .out 为后缀的同名文件内。

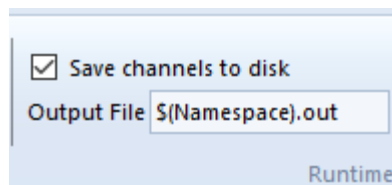


图 6-52

实验注意事项：

- 选取元件的时候，须辨别元件的属性，例如电源是三相还是单相元件。
- 设置元件参数时，要注意参数的物理意义，例如是有效值还是幅值。
- 注意测量信号的方向，例如功率信号。
- 将多个曲线绘制在一张图表上时，须选取合适的范围，将单位标注清楚。

第七章 潮流分析实验

一、实验目的

通过本实验熟悉 PSCAD 仿真软件的功能特点、应用范围和仿真流程，学习发电机、负荷等建模方法，复习电力系统有功、无功、无功补偿装置相关概念，掌握简单的潮流计算。

二、原理与说明

1、实验系统介绍

在 PSCAD 界面下搭建一个系统频率为 50Hz 的单相系统，如图 7-1 所示。

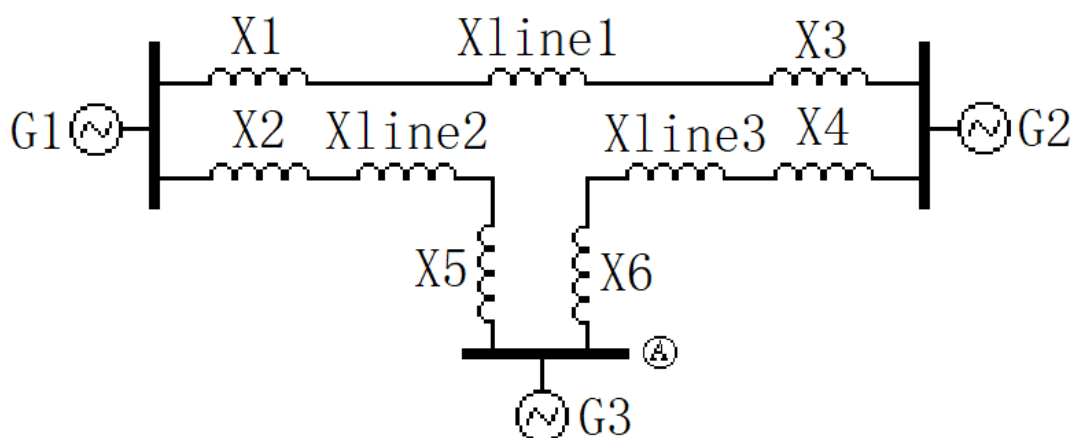


图 7-1

参数如下：

G₁: 理想电压电源，100 kVRMS，相角为 0°，频率为 50 Hz

G₂: 理想电压电源，100 kVRMS，相角为 60°，频率为 50 Hz

G₃: 理想电压电源，100 kVRMS，相角为 30°，频率为 50 Hz

X₁: 频率为 50 Hz 的条件下，感抗为 2 Ω

X₂: 频率为 50 Hz 的条件下，感抗为 2 Ω

- X_3 : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 3Ω
- X_4 : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 3Ω
- X_5 : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 4Ω
- X_6 : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 4Ω
- X_{line1} : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 40Ω
- X_{line2} : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 20Ω
- X_{line3} : 频率为 50 Hz 的条件下, 感抗为 20Ω

仿真设置如下:

电源: 电压源输出坡升至 1.0 p.u.的时间: 0.05 秒

仿真过程总时长: 1 秒 (确保仿真过程达到稳态)

仿真步长: ≤ 50 微秒

2、并联电容器

并联电容器又称为移相电容器,是电力系统中一种重要的无功功率补偿设备,广泛地应用于改善负荷的功率因数。在电力系统常用的无功功率补偿设备中,并联电容器的单位容量费用最低,有功功率损耗最小,运行维护最为简单。它可以根据需要分散地安装在用户处或靠近负荷中心的地点,实现无功功率就地补偿,具有较好的经济效益。

3、并联电抗器

并联电抗器,与并联电容器相反,用于吸收电力系统中过剩的无功功率和远距离输电线的参数补偿。含有超高压架空线路或(和)高压电缆的电力网

络中，在轻负荷运行时各线路分布电容产生的无功功率大于线路电抗中消耗的无功功率，因此会出现无功功率过剩的现象。解决无功功率过剩的措施之一，是在适当地点接入并联电抗器，就地吸收线路的无功功率。

三、实验项目和方法

1、理想电源

步骤一：假设所有电源均为理想电源，按照给定的参数搭建电力网络。分别在图表上绘制以下曲线：

- 三个电源瞬时电压、三个电源瞬时电流，分别放在一张图表上。
- 线电流 i_{Line1} 的瞬时值。
- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。线电流 i_{Line1} 的有效值可以将瞬时值输入单相 RMS 仪表获取。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤二：将 G_3 的电压上调 20% 到 120 kVRMS，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

然后，在 A 点接入 $10\mu\text{F}$ 的并联电容器，观察并联电容器对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤三：在步骤一的基础上将 G_3 的电压下调 20% 到 80 kVRMS，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

然后，在 A 点接入 1H 的并联电抗器，观察并联电抗器对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤四：在步骤一的基础上，将 G_3 的初始相角减少到 10° ，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲

线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤五：在步骤一的基础上，将 G_2 和 G_3 之间的线路感抗(Xline3)减半，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

实验数据填入下表。

稳态时	线电流 i_{Line1} 的有效值	G_3 的有功功率	G_3 的无功功率
步骤一			
步骤二 1			
步骤二 2			
步骤三 1			
步骤三 2			
步骤四			
步骤五			

实验图表直接从 PSCAD 复制到附录里。

2、非理想电源

步骤一：将 4Ω 的 G_2 内部感抗 X_s 考虑进来，分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤二：将 G_3 的电压上调 20%，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤三：在步骤一的基础上，将 G_3 的电压下调 20%，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

步骤四：在步骤一的基础上，将 G_3 的初始相角减少到 10° ，观察上述电压变化对线电流 i_{Line1} 和 G_3 的有功、无功功率的影响。分别在图表上绘制以下曲线：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率随时间变化曲线，放在一张图表上。

达到稳态后，记录以下数据：

- 线电流 i_{Line1} 的有效值。
- G_3 的有功和无功功率。

实验数据填入下表。

稳态时	线电流 i_{Line1} 的有效值	G_3 的有功功率	G_3 的无功功率
步骤一			
步骤二			
步骤三			
步骤四			

实验图表直接从 PSCAD 复制到附录里。

四、分析与思考

1、在理想电源的条件下，改变 G_3 的电压、初始相角对线电流 i_{Line1} 有什么影响？请说明理由。

2、在理想电源的条件下，为使步骤二中 G_3 的功率因数与步骤一相同，应接入多大的并联电容器？请记录计算过程。

3、在理想电源的条件下，为使步骤三中 G_3 的功率因数与步骤一相同，应接入多大的并联电抗器？请记录计算过程。

4、在理想电源的条件下，改变 G_3 的电压、初始相角对 G_3 的有功、无功功率有什么影响？请说明理由。

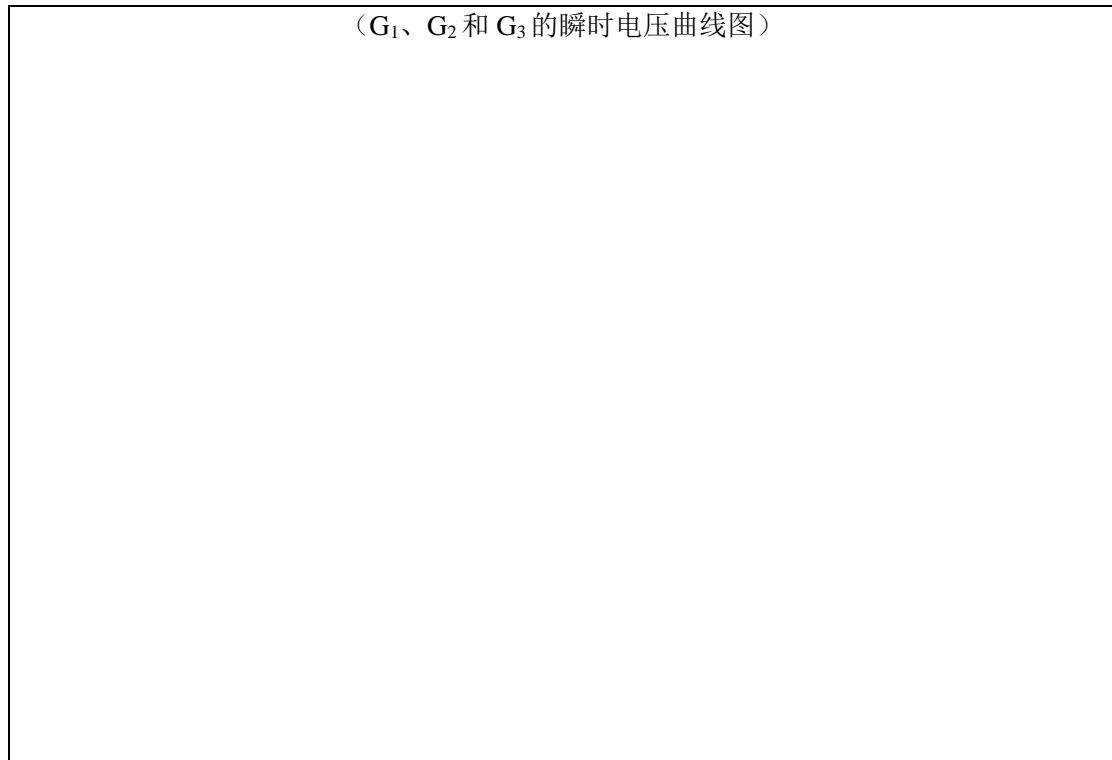
5、在非理想电源的条件下，改变 G_3 的电压、初始相角对线电流 i_{Line1} 有什么影响？请说明理由。

附录：潮流分析实验图表

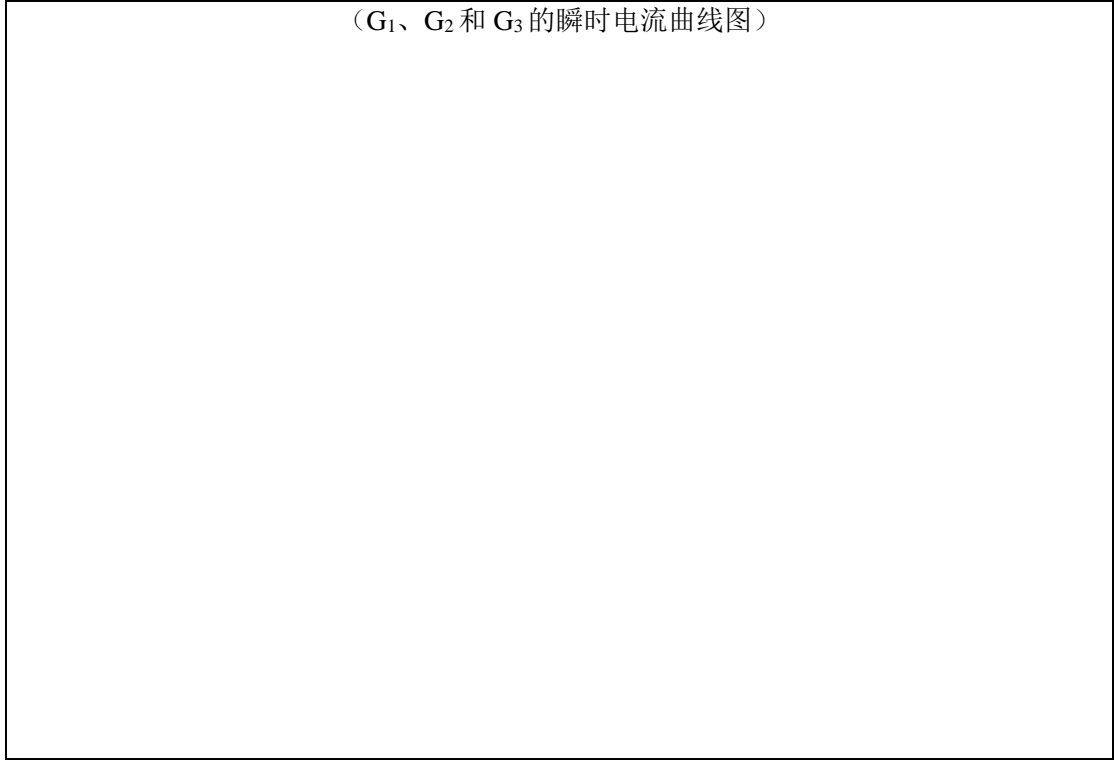
1、理想电源

实验图表直接从 PSCAD 复制到下面的方框里：

步骤一：



(G_1 、 G_2 和 G_3 的瞬时电流曲线图)



(线电流 i_{Line1} 的瞬时值曲线图)



(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)




(G_3 的有功、无功功率曲线图)




步骤二:

1、将 G_3 的电压上调 20%

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



2、在 A 点接入 $10\mu\text{F}$ 的并联电容器

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)




(G_3 的有功、无功功率曲线图)



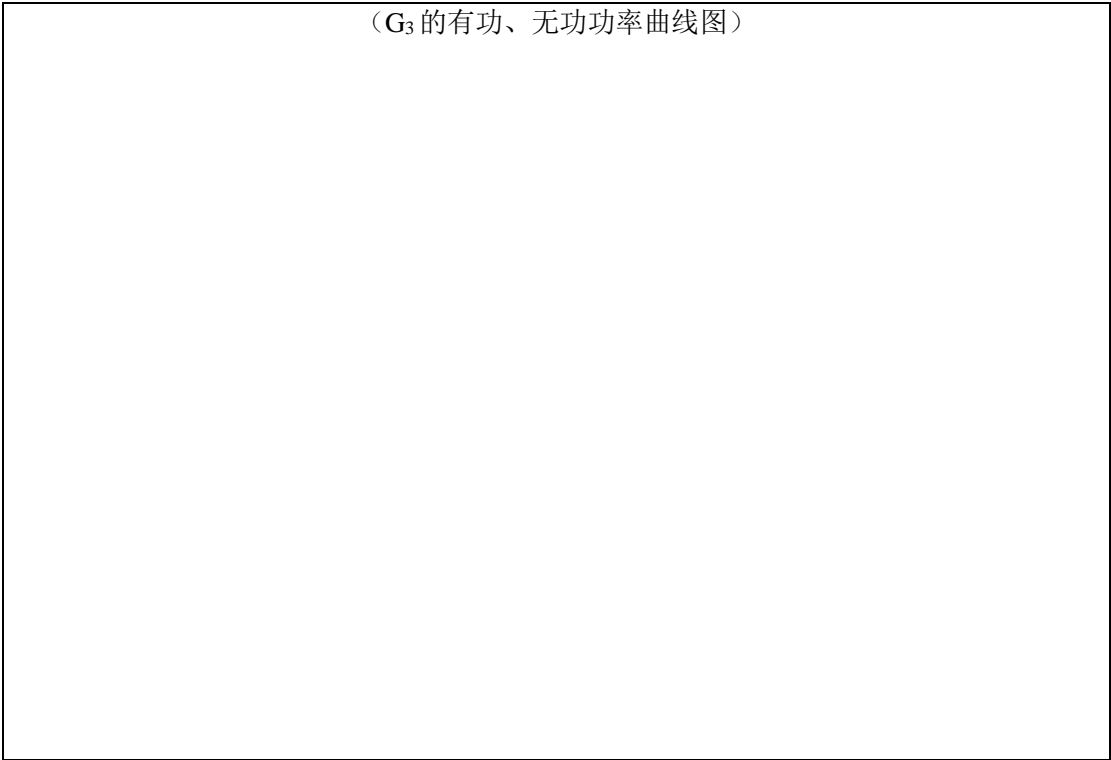
步骤三:

1、 将 G_3 的电压下调 20%

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



2、在 A 点接入 1H 的并联电抗器

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



步骤四:



步骤五:

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)




2、非理想电源


实验图表直接从 PSCAD 复制到下面的方框里：

步骤一：

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



步骤二:

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



步骤三:

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



步骤四:

(线电流 i_{Line1} 的有效值曲线图)



(G_3 的有功、无功功率曲线图)



第八章 变压器暂态分析实验

一、实验目的

学习 PSCAD 仿真软件中变压器和控制元件的使用方法，研究变压器通电暂态过程，学习变压器励磁涌流产生原因与处理方法。

二、原理与说明

1、实验系统介绍

在 PSCAD 平台下搭建一个放射状的单相系统，包括一个电压源 G1、一个单相变压器 T1 和阻性负载，如图 8-1 所示。其中，单相变压器 T1 两端设有断路器 CB1 和 CB2。

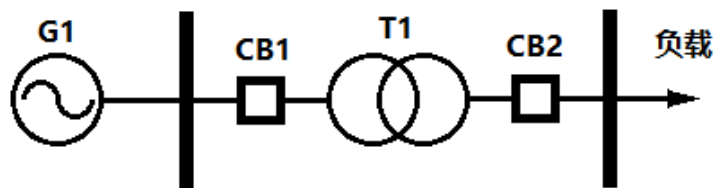


图 8-1

具体参数如下：

- 电源额定电压：220 kV
- 电源额定频率：50 Hz
- 电源初始相角：0 度
- 电源内阻：电阻型，0.1 Ω
- 变压器额定功率：100 MVA
- 变压器额定电压：220/20 kV/kV
- 变压器绕组总漏抗(Leakage reactance)：0.05 p.u.

- 变压器总铁损(Eddy current losses): 0.02 p.u.
- 变压器铜损(Copper losses): 0 p.u.
- 负载电阻: 5 Ω

变压器饱和特性参数如下:

- 空心电抗(Air Core Reactance): 0.25 p.u.
- 额定电压下的励磁电流(Magnetizing Current): 1%
- 膝点电压(Knee Voltage): 1.15 p.u.

预插入电阻 (R_p): 300 Ω

2、变压器励磁涌流分析

所谓励磁涌流,是指当变压器空载合闸或者外部故障切除电压恢复时所产生的数值很大的励磁电流。电力变压器在空载合闸或外部故障切除后,电压恢复时容易产生励磁涌流,励磁涌流的出现将会导致变压器保护误动。变压器误动将会对交流变电站保护控制造成不良的影响,危害电力系统的安全运行。

(1) 铁磁材料的磁学特性

变压器主要是利用电磁感应原理的一种静止电气元件,变压器主要由铁芯和绕组组成,通过设定绕组上线圈匝数比,由于能量守恒定律,可以将具有一定频率的交流电能转变成为另外一种具有相同频率而电压不同的交流电能。作为变压器内部重要的组成部分,铁芯具有两个十分重要的特征:一个是高磁导率,在外部磁场的作用下可以被强烈的磁化;另一个是铁芯的磁滞效应,所谓磁滞,就是在外部磁场停止作用时,铁磁材料依然处于磁化状态,磁滞

曲线如图 8-2 所示，铁磁材料的初始状态为中性，即 $H=B=0$ ，从零开始施加外加磁场，刚开始时磁感应强度 B 随外加磁场的增加迅速增加，随后增加速度减慢，当外加磁场达到最大值 H_S 时，磁感应强度饱和，图 8-2 中 $oabs$ 叫做起始磁化曲线。当磁场从最大值慢慢减小到零时，磁感应强度却不是沿着起始磁化曲线减小到 o 点，而从另一条曲线 SR 返回，从图 8-2 可以看出，磁感应强度随着磁场强度的减小而减小，但是其变化滞后于磁场强度的变化，这种现象称之为磁滞，而磁场强度 $H=0$ 时的磁感应强度 B_r 称为铁芯的剩磁。

由于剩磁 B_r 的存在，当磁场强度反向增大到 H_D 时，磁感应强度减小到零， H_D 叫做磁滞作用的矫顽力，矫顽力越大，说明消除剩磁越难，从而说明保持剩磁能力越大，线段 RD 称为退磁曲线。

从图 8-2 还可以看出，当磁场按照 $H_S \rightarrow 0 \rightarrow -H_D \rightarrow -H_S \rightarrow 0 \rightarrow H_D \rightarrow H_S$ 的次序变化时，磁感应强度 B 将会沿着一条闭合曲线 $SRDRS'R'D'S$ 变化，这条闭合曲线就是磁滞回线。由于磁滞回线效应的存在，变压器中的铁芯材料在不断被磁化 \rightarrow 去磁 \rightarrow 反方向磁化 \rightarrow 反方向去磁，这个过程会产生额外的能量损耗，这种损耗以热的形式从铁芯散发，被称为铁芯的磁滞损耗。经过证明，磁滞损耗的大小与磁滞回线所围的面积成正比。

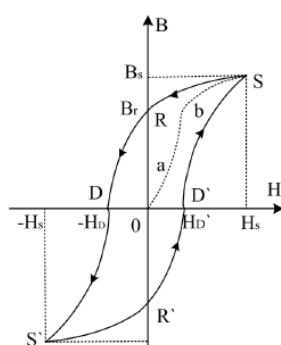


图 8-2 磁滞曲线

如图 8-3 所示，若铁磁材料的初始状态为 $H=B=0$ ，磁化铁磁材料的交变磁场从弱到强依次进行变化，就可以得到一簇面积从小到大并向外扩张的磁滞

回线，将这些磁滞回线的顶点连接起来就可以得到铁磁材料的基本磁化曲线，并由此可以得到磁导率的公式： $\mu = B/H$ ，由于 B 和 H 的非线性关系，铁磁材料的磁导率 μ 也随着 H 的变化而变化，如图 8-4 所示。

图 8-3 基本磁化曲线

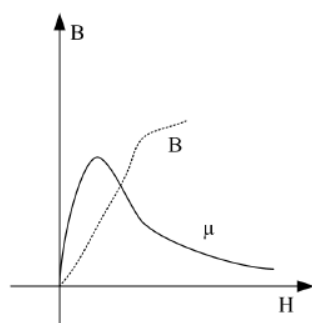


图 8-4 铁磁材料的磁化曲线

(2) 单相变压器励磁涌流产生机理

当电源电压施加在变压器任意一侧绕组时，由于磁通守恒定律，该绕组磁通不能突变，铁芯中将会产生一个相应的暂态磁通来抵制该磁通突变，若该暂态磁通的极性恰好和铁心中的剩磁极性相同，两个叠加的磁通将会造成铁芯的磁通饱和，磁通饱和就会使得变压器励磁电抗下降，从而产生数值很大的励磁电流，该励磁电流就被称为励磁涌流，可以看出，励磁涌流产生的根本原因是变压器铁芯的磁通饱和。单相变压器空载合闸等效电路图如图 8-5 所示。

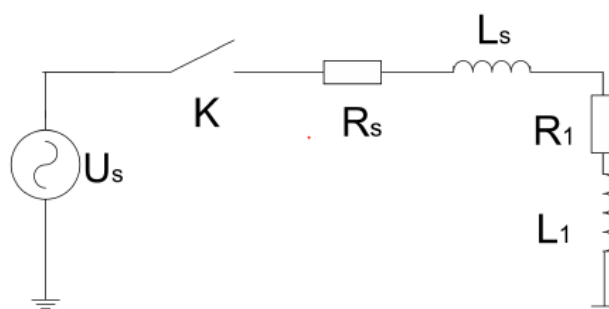


图 8-5 单相变压器空载合闸等效电路图

为了表达方便,以变压器额定磁通和额定电压幅值的基值标么值来表示磁通 Φ 和电压 u , 额定磁通为变压器的运行电压为额定电压时,铁芯中所产生的电压和磁通的关系可以表示为:

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \quad (8.1)$$

设变压器在 $t=0$ 时刻空载合闸,加在变压器上的电压为 $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ 。将式(8.1)带入方程得:

$$\frac{d\Phi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (8.2)$$

解该微分方程得:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_0 \quad (8.3)$$

式中, $-\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态磁通分量; Φ_0 为暂态磁通分量, 由合闸相位角 α 和铁芯剩磁 Φ_s 决定, 即

$$\Phi_0 = \Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_s \quad (8.4)$$

其中, 铁芯剩磁 Φ_s 即合闸之前的变压器铁芯剩磁, 其大小和方向与变压器合闸时刻的磁通有关。

从上式可以看出, 变压器空载合闸时, 铁芯磁通为:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_s \quad (8.5)$$

当变压器处于正常运行状态时, 铁芯一般不会饱和, 励磁电流不会超过额定电流的 2%~10%。而当变压器空载合闸时, 铁芯中的剩磁与稳态磁通在大小和相位上有可能不一致。变压器铁芯中的磁通不能突变, 加上铁芯中原有的剩磁, 就会产生很大的非周期暂态磁通, 使得变压器铁芯严重饱和, 造成励磁阻抗的大幅度下降, 从而在原边产生数值很大的励磁电流, 称为励磁涌流。

而当合闸时刻刚好是电压为 0 的时候， Φ 得到最大值为 $2\Phi_m + \Phi_s$ ，远远大于饱和磁通，此时会造成变压器的严重饱和。 Φ 的波形如图 8-6 所示。

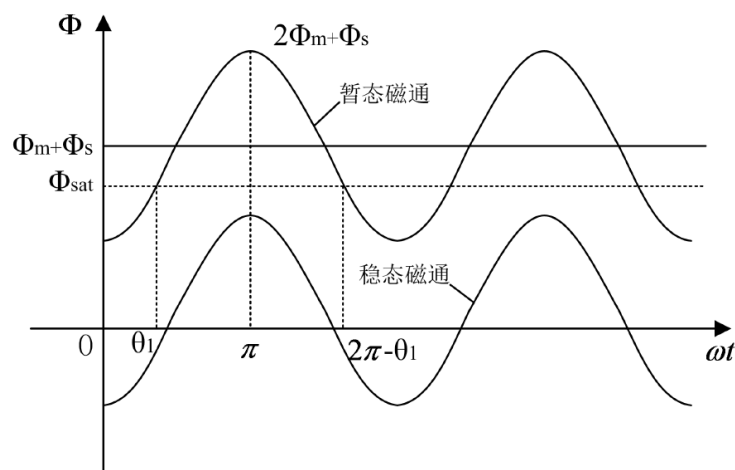


图 8-6 变压器空载合闸磁通波形

综上所述，可以发现单相变压器空载合闸磁通量与合闸相位角 α 和铁芯剩磁 Φ_s 等有关，由此造成的励磁涌流也具有这种特点。

(3) 变压器励磁涌流抑制技术-预插入电阻法

预插入电阻法原理简单，如图 8-7 所示。当变压器空载合闸时在变压器高压侧合闸绕组串联一个预插入电阻，当产生励磁涌流时该预插入电阻可以有效限制励磁涌流，待变压器进入稳态运行时将预插入电阻切除掉。该方法另一个优点是可以加快励磁涌流的衰减速度，经过理论分析可以知道，预插入电阻增加了整个电力系统的阻尼，励磁涌流的衰减时间常数和绕组电阻成正比。

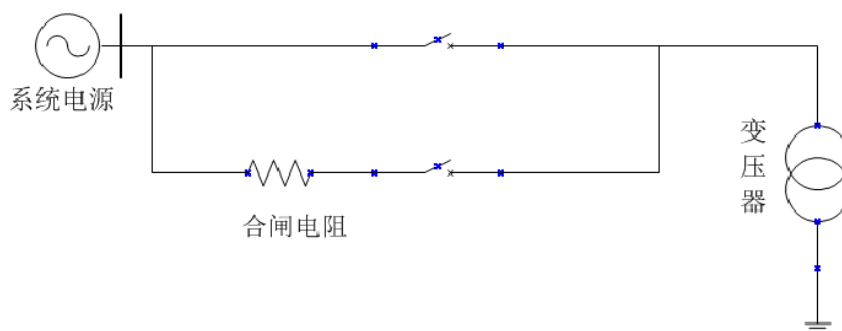


图 8-7 预插入电阻法原理图

3、模型介绍

(1) 变压器模型

单相双绕组变压器 T1 来自主元件库的 TRANSFORMERS 类别组。在 PSCAD 中，单相双绕组变压器有两种显示方式，见图 8-8。这两种显示方式可以互换，对实际仿真过程没有影响。用户可以在参数设置里选择是否模拟理想变压器。这里的理想变压器仅意味着去除励磁支路，仍然要考虑漏抗。非理想变压器包括励磁支路，并可以模拟饱和过程。PSCAD 提供了两种建模方法，即 Classic 和 Unified Magnetic Equivalent Circuit (UMEC)。本实验使用 Classic 模型，铁芯的非线性特性基于膝点、空心电抗和额定电压下的励磁电流进行近似。

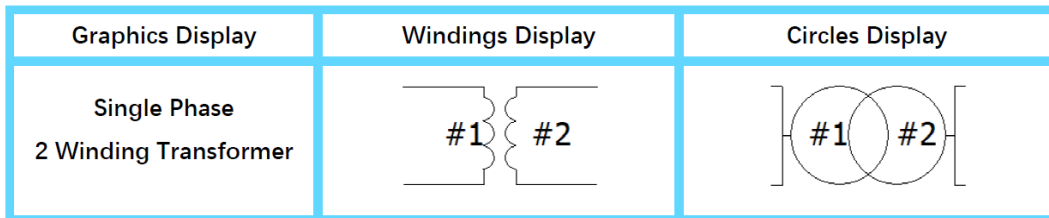


图 8-8

(2) 断路器模型

单相断路器 CB1 和 CB2 来自主元件库的 BREAKERS& FAULTS 类别组。在 PSCAD 中，单相断路器有 Low Voltage Display 和 High Voltage Display 两种显示方式，见图 8-9。这两种显示方式可以互换，对实际仿真过程没有影响。在仿真过程中，随着断路器的分合闸状态发生改变，元件的两种显示方式也会有细微改变，帮助用户直观的区分分合闸状态。断路器被归类为简单的开关模型，通过输入控制信号在分合闸状态之间进行切换。本实验中控制信号

由断路器定时控制逻辑元件（Timed Breaker Logic）（见图 8-10）发出。用户可以使用该元件设置受控断路器的初始状态为 Open（分闸）或 Close（合闸），并可设置断路器动作的时间和次数。Timed Breaker Logic 元件通过输入的信号标签与受控制断路器形成对应关系。例如，断路器命名为 BRK，则需要给 Timed Breaker Logic 元件添加命名为 BRK 的输入信号。

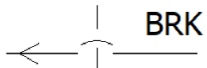
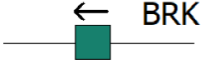
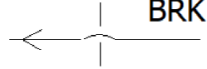
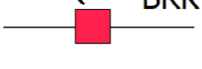

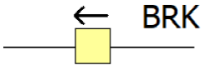
Graphics Display	Low Voltage Display	High Voltage Display
Breaker Status		
Open		
Close		
Pre-Insertion Resistance		

图 8-9

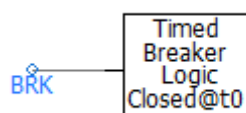


图 8-10

下面介绍 Timed Breaker Logic 元件的设置方法。双击该元件，在弹出的对话框中修改参数，见图 8-11。

Number of Breaker Operations: 断路器的动作次数，指断路器的状态改变次数。断路器从分闸到合闸、从合闸到分闸均为一次动作。本实验中将该值为 1。可观察到 Time of Second Breaker Operation 被虚化。

Initial State: 断路器的初始状态。Open（分闸），Close（合闸）

Time of First Breaker Operation: 断路器第一次动作时间。需根据实际需要由用户设置。

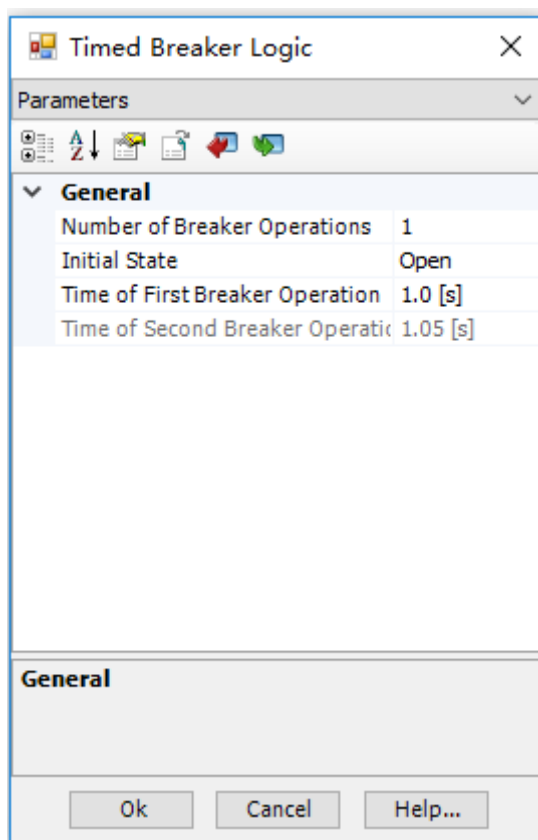


图 8-11

PSCAD 中的断路器可以根据需要添加预插入电阻。当接收到 **Timed Breaker Logic** 的合闸信号时，该电阻经过预插入电阻延迟时间(**Time Delay for Closing Breaker**)中设置的时间延时后并联到断路器上，并经过预插入电阻移除时间(**Time Delay for Bypassing Pre-Insertion**)中设置的时间延时后被移除。这两种延时都是以控制信号从 **Open** 变为 **Close** 的时刻开始计时的。当接收到 **Open** 信号时，断路器断开并立即插入该电阻，并在 **Post-insertion removal** 中设置的延时后被移除。

下面介绍预插入电阻的设置方法。双击断路器元件，在弹出的对话框中修改参数，见图 8-12。

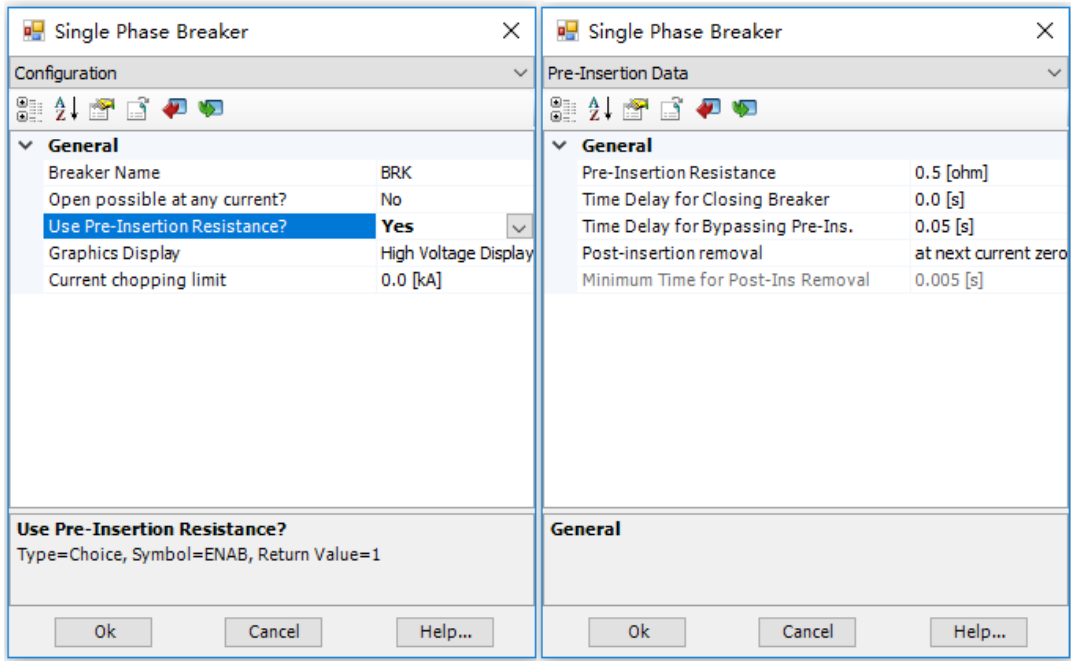


图 8-12

首先，把 Configuration 菜单里 Use Pre-Insertion Resistance 设置成 Yes，表示使用预插入电阻。可观察到 Pre-Insertion Data 菜单被激活。然后，在 Pre-Insertion Data 菜单里设置预插入电阻的参数。

Pre-Insertion Resistance: 预插入电阻的阻值

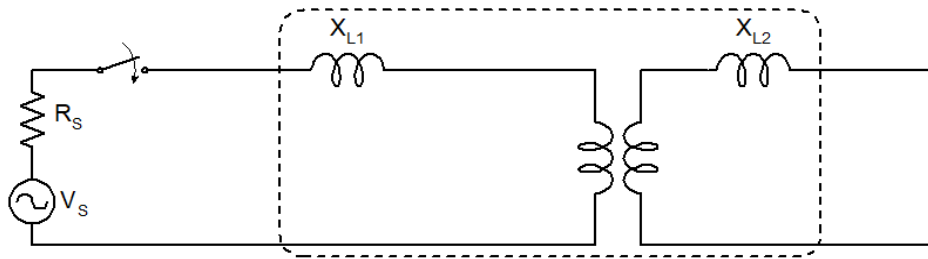
Time Delay for Closing Breaker: 断路器收到合闸信号后，经过该延迟时长把预插入电阻加入电路中。

Time Delay for Bypassing Pre-Insertion: 经过该延迟时长后，断路器合闸，等效于把预插入电阻短路。

三、实验项目和方法

区分以下 4 种运行状态：

- 1) 无励磁支路的理想变压器模型，空载状态。

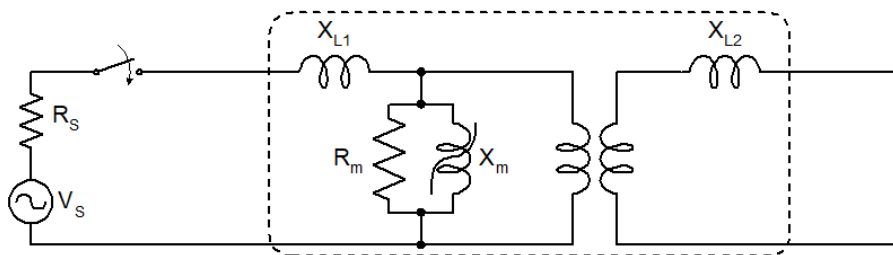


将 CB2 设置为断开状态。

将变压器的 Configuration → General → Ideal transformer model 设置为 Yes，将变压器的 Configuration → Saturation → Saturation enabled 设置为 No，仿真总时长设置为 5 秒。

记录变压器通电后，变压器原边电压和电流在暂态、稳态两种过程中的数值，并绘制成图表。

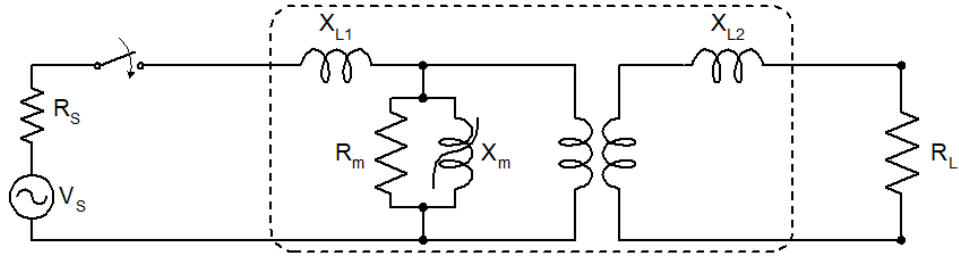
2) 非理想变压器模型，考虑饱和过程，空载状态。



将变压器的 Configuration → Saturation → Saturation enabled 设置为 Yes，仿真总时长设置为 1000 秒。

分别找到断路器 CB1 的最佳和最差两种闭合时机，记录变压器通电后，变压器原边电压和电流在暂态、稳态两种过程中的数值，并绘制成图表。提示：分别测试在 0.2sec, 0.201667sec, 0.203333sec, 0.205sec, 0.206667sec, 0.208333sec, 0.21sec 闭合的仿真结果。

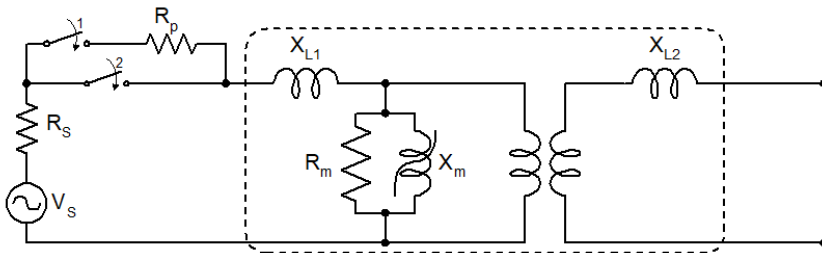
3) 非理想变压器模型，考虑饱和过程，带额定负载。



将 CB2 设置为闭合状态。

分别找到断路器 CB1 的最佳和最差两种闭合时机，记录变压器通电后，变压器原边电压和电流在暂态、稳态两种过程中的数值，并绘制成图表。提示：分别测试在 0.2sec, 0.201667sec, 0.203333sec, 0.205sec, 0.206667sec, 0.208333sec, 0.21sec 闭合的仿真结果。

4) 非理想变压器模型，考虑饱和过程和预插入电阻 R_p ，空载状态。



将 CB2 设置为断开状态。

将 CB1 的 Configuration → General → Use Pre-Insertion Resistance 设置为 Yes。

选取第二种运行状态的最差闭合时间，通过选取一组适宜的预插入电阻延迟时间、预插入电阻移除时间组合来消除励磁涌流。

注意：

1、在稳态过程仿真阶段，由于部分电路震荡时间较长，请使用图表的 zoom in 功能确保图表导出时已经达到稳态。

2、在空载状态下，将断路器 CB2 的初始状态设置为 Open，并将第一次

动作时间的设置为大于仿真时长。

实验数据填入下表，实验图表直接从 PSCAD 复制到附录里。

运行状态	闭合时间	暂态过程	稳态过程
1		(原边电流数值)	
		(原边电压数值)	
2	CB1 最佳闭合时间 =	(原边电流数值)	(原边电流数值)
		(原边电压数值)	(原边电压数值)
	CB1 最差闭合时间 =	(原边电流数值)	(原边电流数值)
		(原边电压数值)	(原边电压数值)
3	CB1 最佳闭合时间 =	(原边电流数值)	(原边电流数值)
		(原边电压数值)	(原边电压数值)
	CB1 最差闭合时间 =	(原边电流数值)	(原边电流数值)
		(原边电压数值)	(原边电压数值)
4	CB1 闭合时间 = 预插入电阻延时时间 = 预插入电阻移除时间 =	(原边电流数值)	(原边电流数值)
		(原边电压数值)	(原边电压数值)


四、分析与思考

- 1、请解释变压器励磁涌流的产生机理与危害。
- 2、请分析预插入电阻法抑制变压器励磁涌流的工作原理。
- 3、请解释如何选择合适的闭合时间。
- 4、请解释第二种运行状态下谐波的产生机制和波形失真的原因。


附录：变压器暂态分析实验图表

1、第一种运行状态

(原边电流曲线图表)



(原边电压曲线图表)



2、第二种运行状态

1. CB1 最佳闭合时间 =

暂态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

稳态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

2. CB1 最差闭合时间 =

暂态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

稳态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

3、第三种运行状态

1. CB1 最佳闭合时间 =

暂态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

稳态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

2. CB1 最差闭合时间 =

暂态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

稳态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

4、第四种运行状态

CB1 闭合时间 =

预插入电阻延迟时间 =

预插入电阻移除时间 =

暂态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

稳态过程：

(原边电流曲线图表)

(原边电压曲线图表)

第九章 PSD-BPA 软件介绍

一、PSD 软件介绍

随着新能源的不断接入，电力系统也在随之发生变化，电网通过互联网络变得越来越复杂，系统稳定问题也越来越突出。无论是对于电力系统规划、设计还是运行，电力系统安全稳定分析都是极其重要的。



是一个大型电力系统分析软件包，是中国电力科学研究院系统所电力系统分析软件包的统一标志，简称 PSD 软件或 PSD 程序。PSD 软件具有计算规模大、计算速度快、数值稳定性好、功能强等特点，已在我国电力系统各大运行、研究、设计单位及部分高校得到广泛应用。

PSD 软件主体由下述部分组成：

- ① PSD-BPA 潮流及暂态稳定程序（原中国版 BPA 程序）；
- ② PSD-PSDB 电网计算数据库系统；
- ③ PSD-EMTPE 电力电子与电磁暂态仿真程序；
- ④ PSD-FDS 电力系统全过程动态仿真程序；
- ⑤ PSD-SCCP 电力系统短路电流计算程序；
- ⑥ PSD-DEQU 电力系统动态等值程序；
- ⑦ PSD-SSAP 电力系统小干扰稳定性分析程序；
- ⑧ PSD-OPF 无功优化程序；
- ⑨ PSD-VSAP 电压稳定分析程序；
- ⑩ PSD-NET 电力系统快速分布式统一计算平台
- ⑪ PSD 集成平台界面：
 - PSDEdit 分析平台；
 - PSD-PSAW 系统分析集成平台。

⑫PSD 软件辅助分析工具系统：

- PSD-PCS 电力系统数字平台；
- PSD-Clique 地理接线图格式潮流图绘制程序；
- PSD-Joy 单线图格式潮流图绘制程序；
- PSD-CurveMaker 稳定曲线绘制工具；
- PSD-MyChart 稳定曲线比较工具等。

二、BPA 程序主要功能

PSD-BPA 程序可进行交流系统潮流计算，也可进行包括双端和多端直流系统的交直流混合潮流计算。除了潮流计算功能外，该软件还具有负荷静特性模型、发电功率控制、节点电压控制、节点 Q-V、P-V、P-Q 曲线求解、灵敏度分析、网络阻抗快速调整模拟、网络简化等值、系统合并、系统事故分析（N-1 开断模拟）、系统网络极限传输水平、潮流图绘制、潮流分析报告输出、检错等多项功能。

三、BPA 潮流计算方法

PSD-BPA 程序采用的计算方法有三种：P-Q 分解法、牛顿-拉夫逊法和改进的牛顿-拉夫逊算法，采用的算法以及迭代的最大步数可以由用户自定义。

为了提高收敛性，通常是先采用 P-Q 分解法进行初始迭代，然后再转入牛顿-拉夫逊法求解潮流。

改进的牛顿-拉夫逊法的主要用途如下：

①该算法适用于求解低压配电网、具有串补的网络和经网络化简以后的等值网络系统的潮流。采用该算法有助于克服由于网络 R/X 比值大而收敛性差的困难。

②该算法可用来处理伪 V θ 节点。所谓伪 V θ 节点是 BPA 程序中新设置的三种节点类型，它们分别是 BJ、BK 和 BL。BJ、BK 和 BL 在计算中的职能见表 9-1。

表 9-1 BJ、BK 和 BL 在计算中的职能

节点类型	初始类型	最终类型
BJ	BS(V θ)	B(PQ)
BK	BS(V θ)	BE(PV)
BL	BS(V θ)	BQ(PV, $Q_{min} < Q < Q_{max}$)

由表 9-1 可知，BJ、BK 和 BL 节点在初始时，都作为 BS 节点（即 V θ 节点）输入，在计算时先作为系统的平衡节点，最后在进入牛顿-拉夫逊法以后再分别转换为 PQ、PV（对无功没有约束）和 PV（对无功有约束）的节点类型，从而可增加计算的灵活性和收敛性能。

该算法的最大迭代步数也可由用户自行选定。计算时也可先用该新算法替代 P-Q 分解法进行若干次迭代计算，然后再转入牛顿-拉夫逊法迭代过程。

四、BPA 程序计算流程

BPA 潮流程序的计算流程如图 9-1 所示。

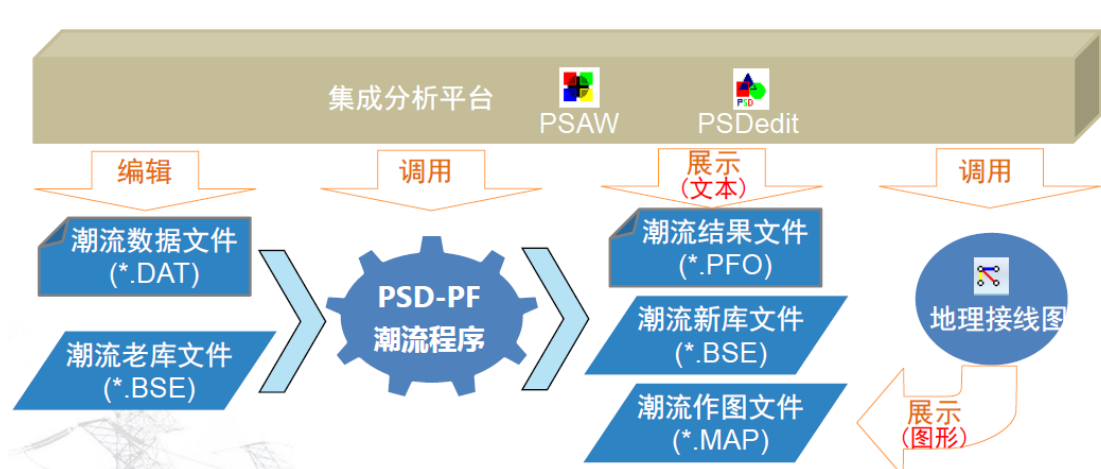


图 9-1 BPA 潮流程序的计算流程

- 潮流数据文件(*.DAT): 文本文件, 包含控制语句和网络数据, 可用文本编辑器打开;
- 潮流结果文件(*.PFO): 文本文件, 包含潮流结果和输出信息, 可用文本编辑器打开;
- 潮流库文件(*.BSE): 二进制文件, 存储潮流计算结果, 用于稳定等其他程序;
- 潮流作图文件(*.MAP): 二进制文件, 存储潮流作图信息, 用于地理接线图程序。

五、数据文件一般结构

潮流数据文件(*.DAT)以行为单位, 主要包括两个部分, 一个部分是节点、支路相关的参数, 另一个部分为控制语句。控制语句多采用自由格式。网络数据由以字母和“+”开头的数据卡组成, 数据卡采用固定格式, 每个数据项都有对应的位置和格式, 必须按列号和格式填写数据。此外, 还有注释语句。注释语句采用以“.”或“C”开头的自由格式, 用以对数据的说明, 不参与计算。

潮流数据文件的典型结构如图 9-2 所示。

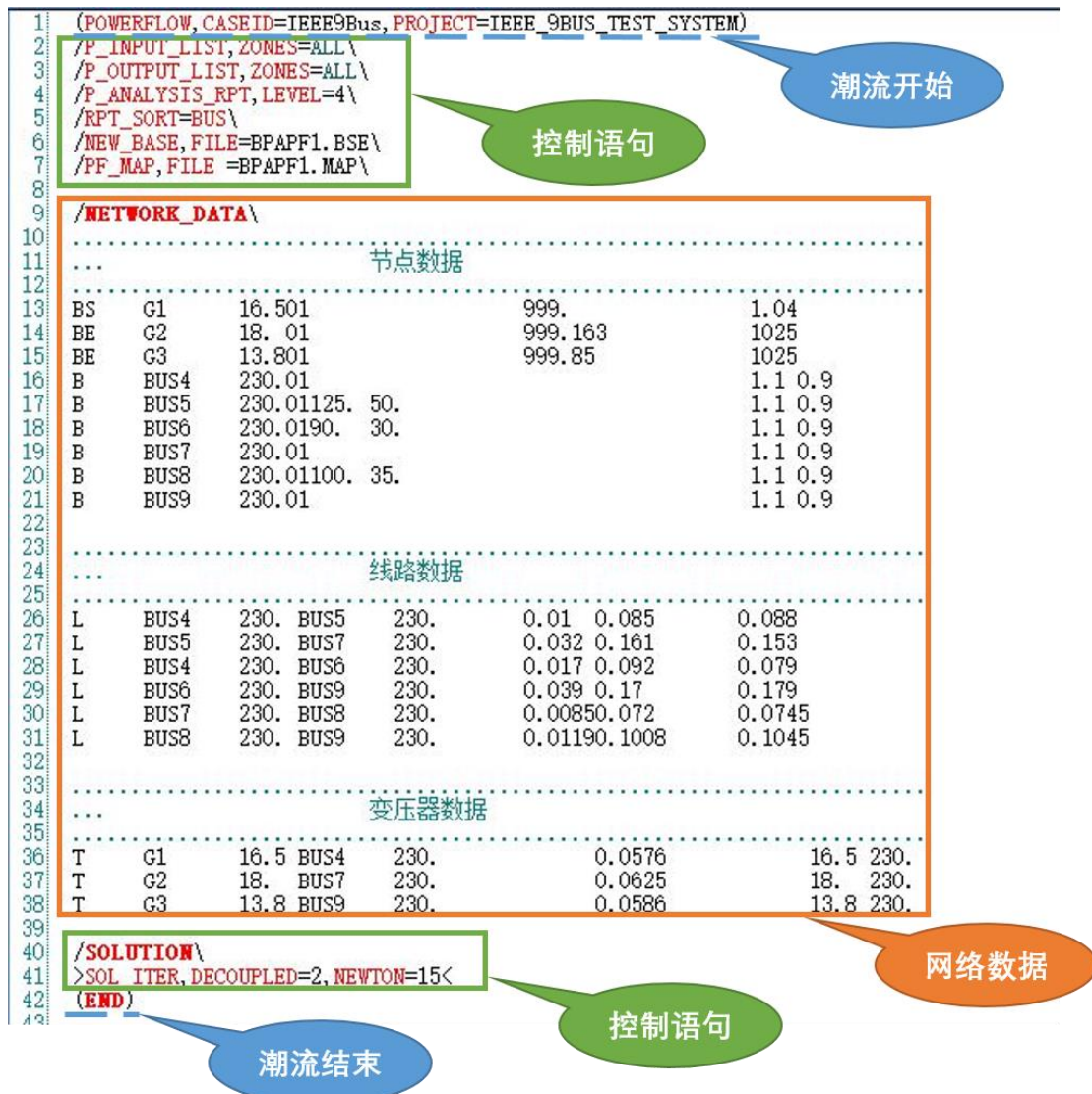


图 9-2 潮流数据文件典型结构

由上图可知，潮流数据文件通常的结构为：

- ①标志开始的一级控制语句“(POWERFLOW,CASEID=方式名,PROJECT = 工程名)”；
- ②控制语句，例如指定输出范围、二进制结果 BSE 文件名、MAP 文件名、迭代次数等。
- ③网络数据，包括节点、线路、变压器等网络参数；
- ④控制语句，部分控制语句必须放在后面；
- ⑤标志潮流数据结束的一级控制语句“(END)”。

第十章 BPA 电力系统建模实验

一、实验目的

- 1、通过实验掌握电力网的结构与结线。
- 2、通过实验掌握标么制换算方法。
- 3、熟悉 BPA 软件操作界面，建立起对 BPA 潮流计算程序功能的理解，熟练掌握运用 BPA 软件建模的方法。
- 4、掌握发电机、负荷、电力变压器、电力线路、无功功率补偿设备等基本元件在 BPA 平台上的建模方法。

二、原理与说明

1、控制语句说明

(1) 控制语句的分类

潮流数据文件主要包括两个部分，一个部分是节点、支路相关的参数，另一个部分为控制语句。潮流程序的所有功能的实现都是由控制语句来完成的。控制语句共分为三级，每一行控制语句都要必须顶格填写，如果第一列为“.”号，则表示注释记录，不作处理，现分述如下：

① 一级控制语句

一级控制语句用“(……)”表示，表示潮流作业的开始和结束。

② 二级控制语句

二级控制语句用“/……\”表示，作用如下：

- 指定潮流作业输入、输出文件名和输出文件内容选择；
- 指定基准功率；
- 指定计算项目内容和求解方法；
- 指定潮流分析报告输出种类；
- 其它功能。

③ 三级控制语句

三级控制语句用“>……<”表示，从属于二级控制语句，用来进一步指定二级控制语句所要求的各种功能。

(2) 控制语句的总体要求

填写控制语句时，注意以下几点：

①所有的一级、二级、三级控制语句都必须顶格填写，即前面不能有空格；最好都用大写字母。如果第一列为空，则为无效的控制语句。

②控制语句有的放在网络数据的前面，有的放在网络数据的后面。

③所有的控制语句中，逗号、空格都看作是分隔符，因此控制语句中用逗号的地方都可以用空格代替；如果有的名称中含有空格，输入时应该用“#”代替空格输入，程序读入后，将字符“#”用空格代替。

例如：控制语句 /NEW_BASE, FILE = 文件名\ 可以写为 /NEW_BASE FILE=文件名\ ，其中的逗号用空格代替。

如果分区为“1”，在控制语句中应该写成“1#”，否则可能出错。

④由于程序对数据行的长度有限制，因此如果控制语句比较长（例如超过100列），应该将其分为多行输入，前一行的最后添加字符“-”，表示下一行是该行的继续。

例如：

```
/P_OUTPUT_LIST, ZONES=AA,BB,CC,DD,EE,FF,GG,HH,II,JJ,KK,-  
MM,NN\
```

⑤在关键字中，所有的字符“_”均为无用字符，因此可以根据需要在关键字中任意位置增加“_”。

例如：控制语句 /P_OUTPUT_LIST, FULL\ 可以写成 /P_OUT_PUT_LIST, FULL\ 。

⑥对于需要进行功能选择的各级控制语句，选择项第一项为缺省值，其余为可选择的内容，通常取缺省值便可满足大多数用户的需要，如果取缺省值，可不填写相应的控制语句。

例如，潮流结果输出选择控制语句

```
/P_OUTPUT_LIST, NONE, FAILED_SOL = FULL_LIST\  
FULL, PARTIAL_LIST\  
NO_LIST\  
ZONES=分区名\  
ZONES=ALL, FULL, or NONE\
```

其中的是否输出的选项有 NONE、FULL、ZONES 等，第一项为 NONE，则缺省选项就为 NONE。

(3) 常用的控制语句

本节主要介绍潮流数据文件中经常使用的控制语句。

①指定潮流文件开始的一级控制语句

(POWERFLOW, CASEID = 潮流方式名, PROJECT = 工程名)

该语句表示开始潮流作业的处理，是潮流数据文件中的第一条控制语句，必须填写。该控制语句中必须填写潮流方式名 CASEID 和工程名 PROJECT，潮流方式名最多可指定 10 个字母，工程名最多可指定 20 个字母。

在此控制语句后面可以填写二级或三级控制语句。该语句在潮流数据文件

中必须是第一条控制语句。

②表示潮流作业结束的一级控制语句

(END)或(STOP)

该语句表示潮流作业的结束，为必有的控制语句，通常填写在潮流数据的最后一行。如果此控制语句后面有其它的数据或者控制语句，这些控制语句和数据都是无效的。

③指定输出输入的原始数据的二级控制语句

**/P_INPUT_LIST, NONE\
FULL, ERRORS = NO_LIST\
LIST\
ZONES=分区名\
ZONES=ALL, FULL, or NONE**

该语句确定 PFO 文件中是否输出输入的原始数据，以及输出的格式。

- NONE: 不输出（缺省值）；
- FULL: 全部输出；
- ZONES = 分区名: 按照分区输出，制定的分区名用逗号隔开；
- ZONES = ALL, FULL: 全部输出；
- ZONES = NONE: 不输出；
- ERRORS = NO_LIST 表示遇到致命性(F)错误时不输出原始数据，但会给出错误诊断信息；而当选择 ERRORS=LIST 时，则仍输出。

④指定计算结果输出顺序的二级控制语句

**/RPT_SORT = BUS\
ZONE\
AREA**

该控制语句各选项的含义如下：

- BUS: 按照节点字符顺序输出；
- ZONE: 按照分区顺序输出；
- AREA: 按照区域顺序输出。

⑤指定计算结果输出的二级控制语句

**/P_OUTPUT_LIST, NONE, FAILED_SOL = FULL_LIST\
FULL, PARTIAL_LIST\
NO_LIST\
ZONES=分区名\
ZONES=ALL, FULL, or NONE**

该语句确定 PFO 文件中潮流计算结果的输出方式，包括“母线电压、角度、出力、负荷及其相连线路功率、损耗、充电功率等”相关数据列表的输出。

第一个控制选项含义如下：

- NONE : 不输出；
- FULL: 输出系统中所有节点及相连线路的数据；
- ZONES=分区名: 输出指定分区内所有节点和相连线路的数据，填写

多个分区名时，各个分区之间用逗号隔开；

- ZONES=ALL, FULL: 输出系统中所有节点及相连线路的数据；
- ZONES=NONE: 不输出。

第二个选项 FAILED_SOL 的含义如下：

- FULL_LIST: 迭代不收敛时，输出系统中所有节点及相连线路的数据；
- PARTIAL_LIST: 迭代不收敛时，输出部分节点和相连线路的数据，这里的“部分”指的是前面选项中“ZONES=分区名”中的分区。
- NO_LIST: 迭代不收敛时，不输出。

第一个选项的缺省值为 NONE，第二选项的缺省值为 FULL_LIST，即在不填写该控制语句的条件下，如果潮流计算收敛，不输出节点及相连线路的数据；如果潮流计算不收敛，输出所有节点及相连线路的数据。

在输出上述节点及相连线路潮流结果数据时，输出的顺序由控制语句 /RPT_SORT=BUS/ZONE/AREA\ 决定。

P_INPUT_LIST 语句和 P_OUTPUT_LIST 语句共用同一个 RPT_SORT 控制语句。

例如，如果输出全部的潮流计算结果，按照分区的顺序输出，应填写如下的控制语句：

```
/P_OUTPUT_LIST, FULL\  
/RPT_SORT=ZONE\  

```

⑥指定潮流结果分析报告输出的二级控制语句

```
/P_ANALYSIS_RPT, LEVEL = 2, *\  
1, ZONES=分区名\  
3, OWNERS=所有者名\  
4
```

该控制语句包括两个参数，第一个参数 LEVEL 填写 4 个不同的数据列表等级；第二个参数指定输出的范围：

- *: 整个系统；
- ZONES=分区名: 指定分区，分区名之间用逗号分开；
- OWNERS=所有者名: 指定区域名，区域名之间用逗号分开。

潮流计算完成后，自动形成多个分析报告，包括：

- 1) 用户自己定义输出列表
- 2) 系统未安排无功功率一览表
- 3) 按所有者（电力局）分类输出的系统发电功率和负荷一览表
- 4) 按分区分类输出的系统发电功率和负荷一览表
- 5) 系统电压越限节点一览表
- 6) 过载线路一览表
- 7) 过载变压器一览表
- 8) 过激变压器一览表
- 9) 按所有者（电力局）分类的输电系统损耗一览表
- 10) 按分区分类的系统损耗数据列表
- 11) 工业负荷数据列表
- 12) 直流系统分析表
- 13) 并联电抗器、电容器一览表

- 14) 带负荷调压变压器和移相器一览表
- 15) 无功受控节点一览表
- 16) AGC 控制一览表
- 17) 带有可投切并联补偿装置节点一览表
- 18) 无功补偿可调节节点一览表
- 19) 串补输电线路一览表
- 20) 节点电压、功率等一览表
- 21) 系统旋转备用容量一览表
- 22) 按所有者分类的输电线效率分析表
- 23) 按所有者分类的变压器效率分析表

程序将这些数据列表分为 4 级,第一级包括上面的 1~2,第二级包括 1~19,第三级包括 1~20,第四级包括 1~23。使用上述控制语句指定输出的级别,就可以输出相应的数据列表。

例如:输出第三级分析列表,可以填写控制数据卡

```
/P_ANALYSIS_RPT, LEVEL = 3\
```

⑦指定潮流结果输出二进制文件(.BSE)的控制语句

```
/NEW_BASE, FILE=文件名\
```

该语句指定潮流结果输出的二进制文件名,此文件用于在此基础上所进行的其他潮流计算和稳定计算。考虑到稳定计算的方便性,建议文件扩展名使用 BSE。

例如,指定二进制结果文件为“IEEE9.BSE”,则可以写为

```
/NEW_BASE, FILE = IEEE9.BSE\
```

⑧指定潮流图和地理接线图用的数据文件(.MAP)的控制语句

```
/PF_MAP, FILE = 文件名\
```

该语句指定供单线图格式潮流图及地理接线图格式潮流图程序使用的二进制结果文件名。考虑到潮流图程序使用的方便性,建议文件扩展名使用 MAP。

⑨指定系统基准容量的控制语句

```
/MVA_BASE = 100\  
      (number)\
```

该语句指定系统的基准功率,单位为 MVA。缺省值为 100MVA,也可根据需要指定为任意值 (number)。

例如,指定系统的基准容量为 1000MVA,必须填写如下控制语句:

```
/MVA_BASE = 1000\
```

⑩指定网络数据的控制语句

```
/NETWORK_DATA, FILE = *, RXCHECK = ON\  
      (文件名)          OFF\
```

该语句指定要输入的网络数据文件,如果 FILE=* 或者无此项,则输入数据要紧跟在这一语句之后。RXCHECK 是对 R/X 比值进行检查,以便于排除数据错误。

⑪ 注释语句

1) /COMMENT\

该控制语句后面最多可有 50 条注释记录, 每条记录第一列都必须填写 C, 从第 2 列到第 80 列为注释内容。

如果采用二级控制语句“/P_INPUT_LIST, ……\”输出网络数据或者采用二级控制语句“/P_OUTPUT_LIST, … …\”输出计算结果列表时, 该注释语句都会出现在这两个部分数据前面。

2) “.”

在潮流数据文件中的任意一行数据前面添加符号“.”, 表示该行为注释行。

2、网络数据说明

(1) 数据卡片的分类

主要的数据卡片可分为四类, 分别为区域控制、节点数据、支路数据及节点数据修改卡。

① 区域控制数据卡包括:

- 1) AC、A, 指定参与区域功率交换的分区及安排交换功率量;
- 2) AO, 按区域分类输出;
- 3) I, 指定区域交换功率。

② 节点数据卡包括:

- 1) B, 交流节点卡;
- 2) BD, 两端直流节点卡;
- 3) BM, 多端直流节点卡;
- 4) +, 延续节点卡;
- 5) X, 可切换电抗、电容器卡。

③ 支路数据卡包括:

- 1) L, 对称线路卡;
- 2) LD, 两端直流线路卡;
- 3) LM, 多端直流线路卡;
- 4) T, 变压器和移相器卡;
- 5) R, 带负荷调压变压器调节数据卡;
- 6) E, 不对称等值支路卡;
- 7) RZ, 可快速调整的线路串补数据卡。

④ 数据修改卡包括:

- 1) P, 系统中发电出力和负荷按百分数修改卡;
- 2) Z, 分区重新命名卡;
- 3) DZ, 分区删除卡。

(2) 数据卡片的总体要求

各数据卡片有几个共同的特点，现说明如下：

①名称

区域(AREA)、分区(ZONE)、节点和线路等的名称或者所有者(OWNER)可用英文字母及数字填写，也可用汉字，建议顶格填写，中间不要留空，以免程序检索时出错(空格也是字符)，若名称前面有空格，程序自动去掉空格。

②数据格式

由数据格式卡可以看到，在数据栏目内的某些位置上都有小数点，这是由程序安排的缺省小数点，用户可以只填数字不填小数点，这时程序认为省缺小数点生效，程序读入的数带有这一小数点；用户也可以直接填入小数点，这时省缺的小数点无效，程序按用户填入值读入。

为了避免出错，建议对于浮点数，尽量填写小数点。

(3) 常用的数据卡片

①B—交流节点数据卡

所有节点(包括无源节点)都要填写B卡，格式如图10-1所示。

S U B T P D E	C H G N E R	O W N E R	NAME	KV	Z O N E	LOAD		SHUNT		P M A X	P G E N M W	Q S C H E D Q M A X M V A R	Q M I N M V A R	V H O L D V M A X P U	V M I N P U	REMOTE BUS		%S V P A P R L S D											
						P M W	Q M V A R	L O A D - +	C A P - R E A -							N A M E	K V												
																			M W	M V A R									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

图 10-1 B 卡数据格式

列	格式	内容
1	A1	卡片类型—B
2	A1	卡片子型 各子型如下： 空白：PQ节点。 E：PV节点，无功出力没有限制，但为达到控制电压，无功出力超过上下限时，超过部分无功称为未安排无功，程序自动装上电容器或电抗器。 Q：PV节点，但节点无功功率有限制值： $Q_{min} < Q < Q_{max}$ ，当越界时，自动转换为PQ节点。 S：Vθ节点，为交流同步网的缓冲机。 X：在该节点装有电抗器或者电容器，由程序自动控制投切电抗器或者电容器，以维持该节点或者其它节点的电压为给定值。由于所安排的投切量是离散值，因此这种电压控制方式是近似的。此子型要与X卡连用，由X卡安排投切量。 T：PQ节点，但节点电压受带负荷调压变压器控制。 C：PQ节点，但节点电压受某发电机控制。 V：PQ节点，但节点电压有限制值： $V_{min} < V < V_{max}$ ，当电压越界时，自动转换为PV节点，这时Q起变化，以

保证电压在限制值内，由此产生的未安排无功，将由程序自动装上电容器（电抗器）来平衡。

G: PV 节点（其为发电机节点），缺省电压在 0.95~1.15 之间变化，并去控制 BC 节点的电压。其无功 Q 也有限制，当 Q 越限时，中止电压控制。被控节点不可以是 V0 节点、BG 节点或者其它已处于被控状态下的节点。

F: 在计算中先作为 PV 节点，待有功功率 P 收敛后再自动转换为 B (PQ) 节点。

J: 在采用改进的牛顿-拉夫逊法时作为 BS 节点，当解法转化为牛顿-拉夫逊法以后，该节点自动转换为 B (PQ) 节点。

K: 在采用改进的牛顿-拉夫逊法时作为 BS 节点，当解法转化为牛顿-拉夫逊法以后，该节点自动转换为 BE (PV) 节点。

L: 在采用改进的牛顿-拉夫逊法时作为 BS 节点，当解法转为牛顿-拉夫逊法以后，该节点自动转换为 BQ(PV 节点， $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$) 节点。

3	A1	修改码
4-6	A3	所有者代码 用于确定区域功率交换中联络线的测点和输出表中按所有者分类的分析报告，可不填，以下各卡均同此项。
7-18	A8, F4.0	节点名称 (7-14) 和基准电压 (kV) (15-18)
19-20	A2	节点所在的分区名称，在区域功率交换中用于确定区域的分区，在系统合并和按分区分类输出时也有用到。
21-30	2F5.0	以 MW 和 Mvar 表示的恒定负荷，无功正值为感性、负值为容性。
31-38	2F4.0	以 MW 和 Mvar 表示的、在基准电压下的节点并联导纳负荷，无功：(+) = 容性，(-) = 感性。注意：对于 BX 节点，此项忽略。
39-42	F4.0	Pmax: 最大有功出力 (MW)
43-47	F5.0	Pgen: 实际有功出力 (MW)
**48-52	F5.0	对于 PQ 节点（即 B、BC、BT、BV 节点）此项填所安排的无功出力值 QSCHEDE (Mvar)；对于其它节点此项填无功出力最大值 Qmax (Mvar)：(+) = 容性，(-) = 感性。
**53-57	F5.0	无功出力最小值 Qmin (Mvar)
58-61	F4.3	所安排的电压值或者 Vmax (标么值)
62-65	F4.3	所安排的 Vmin 值 (标么值)，对于 V0 (即 BS 型) 节点，此项填角度值，注意此时省缺的格式为 F4.1，单位为度。
66-77	A8, F4.0	对于 BG 和 BX 节点有用，填写其所要控制的节点名 (66-73) 和基准电压 (74-77)。要控制的电压值填在被控节点记录卡。
78-80	F3.0	发电机在对远方节点作电压控制时，提供的无功功率的百分数。

**对于 B、BC、BT、BV 节点，应该填 $Q_{min}=0$ ，如果填入 Q 的限制值，则该限制值被当作是错误的限制条件，将被忽略。对于其它节点，无功功率分配的优先度为：

首先将无功功率分配给可变并联电抗器或者电容器；此后，如有必要，再


T I P E	S H I F T	C O N T A I N E R	O W N E R	NAME1	kv1	M E T E R	NAME2	kv2	I D E N T I F I C A T O R	S E C T I O N	TOTAL MVA RATE	# O F O K T	Zpi		Ypi		PHASE SHIFT DEG		TP1 kV	TP2 kV	DATE IN		DATE OUT						
													R	X	G	B	M T H	Y R			M T H	Y R							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

图 10-3 T、TP 卡数据格式

列	格式	内容
1	A1	卡片类型 - T
2	A1	卡片子型 空白：变压器 P：移相器
3	A1	修改码
4-6	A3	所有者代码
7-18	A8, F4.0	节点名 1 (7-14) 和基准电压 (kV) (15-18)
19	I1	区域联络线测点 (作区域联络线功率控制时有用), 详见 L 卡。
20-31	A8, F4.0	节点名 2 (20-27) 和基准电压 (kV) (28-31)
32	A1	并联回路标志, 即回路号
33	I1	分段串联而成的线路的段号
34-37	F4.0	变压器额定容量 (MVA), 供过负荷检查用。
38	I1	并联变压器组的台数, 仅作信息用。
39-50	2F6.5	R—由铜损引起的等效电阻 (标么值) (39-44) X—漏抗 (标么值) (45-50)
51-62	2F6.5	G—由铁损引起的等效电导 (标么值) (51-56) B—激磁电纳 (标么值) (57-62)
63-67	F5.2	节点 1 的分接头位置 (kV)。或者为移相器的固定移相角 (度), 该角度表示节点 1 相对节点 2 的角度。
68-72	F5.2	节点 2 的分接头位置 (kV), 对移相器此项空白。
75-77	A1, I2	投运日期, 详见 L 卡, 可不填。
78-80	A1, I2	停运日期, 详见 L 卡, 可不填。

3、PSD-BPA 程序常用功能

(1) 新建潮流数据文件

在路径 D:\PSD\PSDEdit 点击  PSDEdit.exe 打开 PSDEdit 集成界面, 如图 10-4 所示。

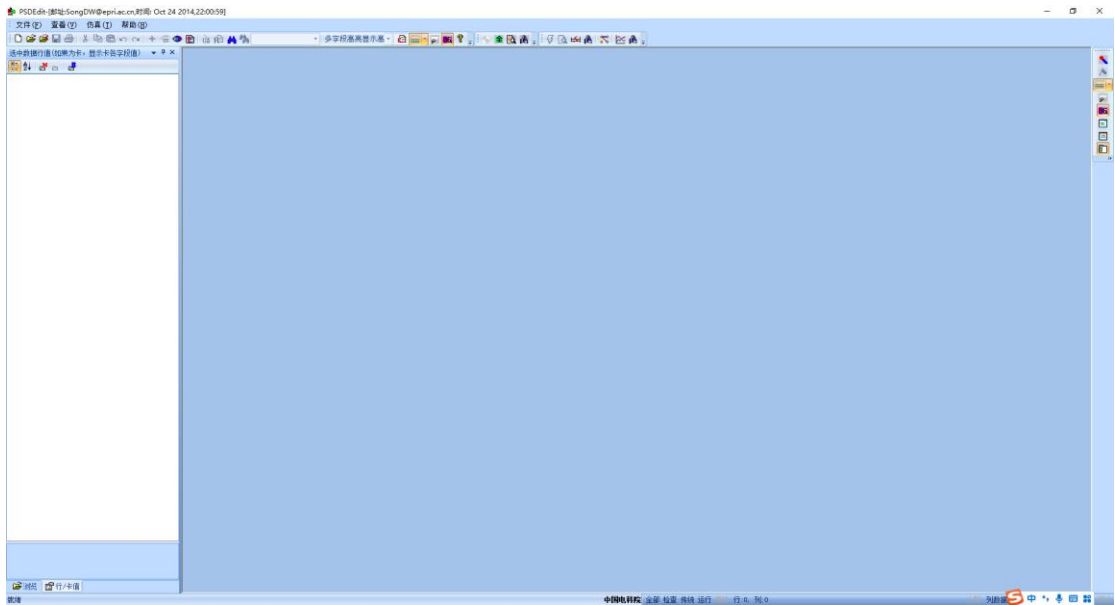



图 10-4 PSDEdit 集成界面

点击 PSDEdit 集成界面左上角的  图标或选择主菜单“文件”→“新建文件”，在弹出对话框新建.dat 潮流数据文件，如图 10-5 所示。

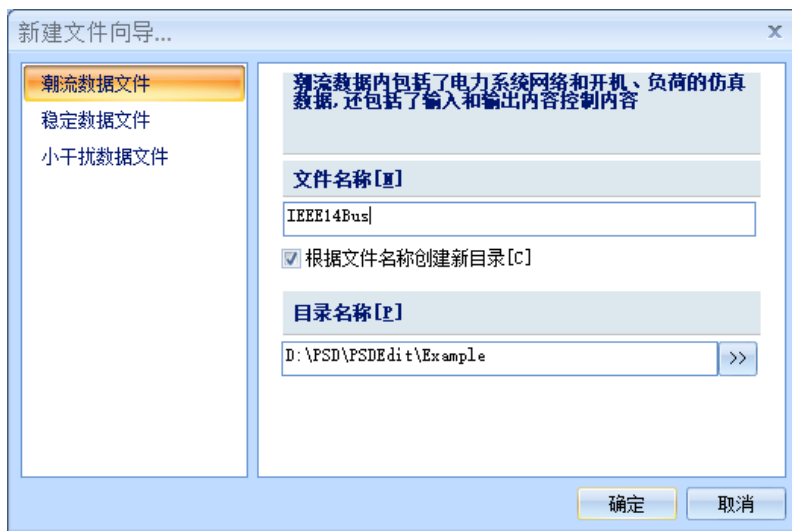


图 10-5 新建文件对话框

(2) 执行潮流计算


点击执行潮流或稳定计算图标  或选择主菜单“仿真”→“潮流/稳定计算”，进行潮流计算，在输出对话框（见图 10-6）确认潮流计算结果。



图 10-6 输出对话框显示潮流计算结果

潮流计算结果总评价返回值代表含义见表 10-1。

表 10-1 潮流计算结果总评价返回值及其含义

程序返回值	含义
2	存在致命错误，计算终止
3、4	潮流不收敛
5	潮流收敛有警告
6	潮流收敛无警告
7	程序未授权
其他	程序调用失败

三、实验项目和方法

1、实验系统介绍

图 10-7 为实验系统接线图。该系统为 100kV 输电线路，系统共五台发电机分别接在节点 1、2、3、6、8，其中节点 1 作为平衡机。

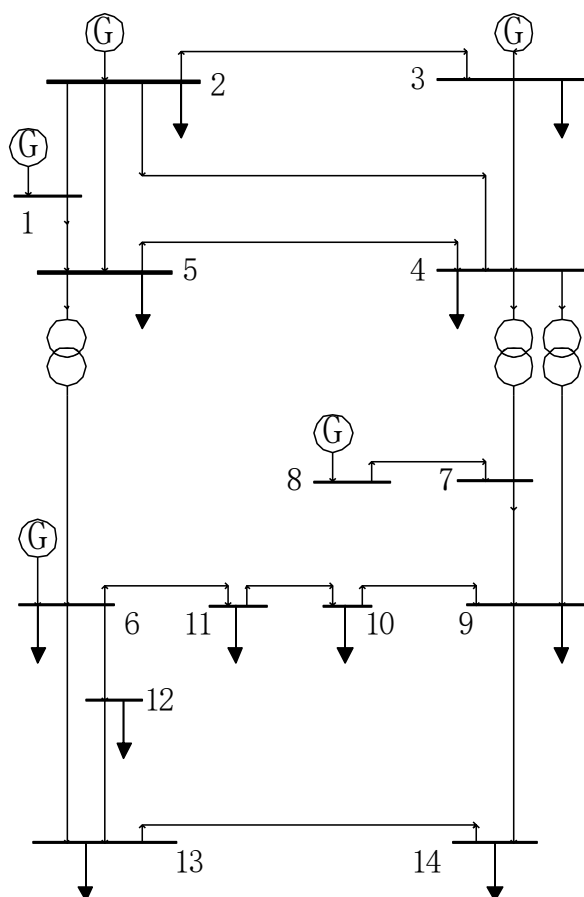


图 10-7 实验系统接线图

系统参数如下。

表 10-2 支路数据 ($S_B = 100MVA$, $V_B = 100kV$)

支路号	首端 母线号	末端 母线号	支路电阻 (标么值)	支路电抗 (标么值)	1/2 充电电容电纳 (标么值)
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0264
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0246
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0219
4	2	4	0.05811	0.17632	0.0187
5	2	5	0.05695	0.17388	0.017
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0173
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0064
8	6	11	0.09498	0.1989	0
9	6	12	0.12291	0.25581	0

10	6	13	0.06615	0.13027	0
11	7	8	0	0.17615	0
12	7	9	0	0.11001	0
13	9	10	0.03181	0.0845	0
14	9	14	0.12711	0.27038	0
15	10	11	0.08205	0.19207	0
16	12	13	0.22092	0.19988	0
17	13	14	0.17093	0.34802	0
18	4	7	0	0.20912	0
19	4	9	0	0.55618	0
20	5	6	0	0.25202	0

注：支路 18、19、20 为变压器支路。

表 10-3 变压器数据 ($S_B = 100MVA$, $V_B = 100kV$)

首端母线号	末端母线号	变比 (标么值)
4	7	0.978
4	9	0.969
5	6	0.932

注：非标准变比在首侧。

表 10-4 并联电容数据 ($S_B = 100MVA$, $V_B = 100kV$)

母线号	电纳 (标么值)
9	0.19

表 10-5 负荷数据

母线号	有功功率(MW)	无功功率(Mvar)
2	21.7	12.7
3	94.2	19.1
4	47.8	-3.9
5	7.6	1.6
6	11.2	7.5
9	29.5	16.6
10	9	5.8
11	3.5	1.8
12	6.1	1.6
13	13.5	5.8
14	14.9	5

表 10-6 发电数据

母线号	电压(标么值)	有功功率(MW)
-----	---------	----------

1	1.06	232.3
2	10.45	40

表 10-7 无功可调母线数据

母线号	电压(标么值)	无功功率极限值(Mvar)	
		下限	上限
2	10.45	-40	50
3	1.01	0	40
6	1.07	-6	24
8	1.09	-6	24

2、BPA 系统建模


- (1) 新建一个名为 IEEE14Bus.dat 的潮流数据文件。
- (2) 在新建的.dat 文件添加控制语句和网络数据卡。
- (3) 点击执行潮流或稳定计算图标  或选择主菜单“仿真”→“潮流/稳定计算”，进行潮流计算，在输出对话框确认潮流计算结果。
- (4) 潮流计算收敛后，查看.pfo 潮流计算结果文件并将计算结果记录到下表。

表 10-8 潮流计算结果

母线号	母线电压		发电机输出功率	
	幅值 (标么值)	相角 (°)	有功功率 (MW)	无功功率 (Mvar)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				

表 10-9 潮流数据总结

数据类型	有功功率 (MW)	无功功率 (Mvar)
------	--------------	----------------

发电机出力		
负荷		
节点并联导纳		
系统损耗		

(5) 摘选.pfo潮流计算结果文件的关键表格复制到下面的方框里:

①计算过程迭代信息表

②详细的输出列表 – 潮流支路列表

③详细的输出列表 – 分区数据总结与整个系统的数据总结

④输出分析列表 - 节点相关数据列表

3、系统升压

(1) 将系统电压等级改为 220kV，根据有名值重新计算网络阻抗，并新建一个名为 IEEE14BusHV.dat 的潮流数据文件。

(2) 执行潮流潮流计算，在输出对话框确认潮流计算结果。

(3) 潮流计算收敛后，查看.pfo潮流计算结果文件并将计算结果记录到下表。

表 10-10 潮流计算结果

母线号	母线电压		发电机输出功率	
	幅值 (标么值)	相角 (°)	有功功率 (MW)	无功功率 (Mvar)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

10				
11				
12				
13				
14				

表 10-11 潮流数据总结

数据类型	有功功率 (MW)	无功功率 (Mvar)
发电机出力		
负荷		
节点并联导纳		
系统损耗		

四、分析与思考

- 1、PSD-BPA 软件的数据文件由哪几部分构成？其控制语句各有什么作用？
- 2、电力系统潮流计算的用途有哪些？
- 3、为什么要使用标么值？以及如何计算标么值？
- 4、根据实验结果举例说明系统电压等级升高有什么效果？
- 5、PSD-BPA 软件的潮流计算模型建模有哪些注意事项？
- 6、实验过程中遇到哪些问题，如何解决？有哪些实验收获？

附录：

1、IEEE14Bus.dat 潮流数据文件

将 IEEE14Bus.dat 潮流数据文件复制到下面的方框里：

2、IEEE14BusHV.dat 潮流数据文件

将 IEEE14BusHV.dat 潮流数据文件复制到下面的方框里：

第十一章 BPA 潮流分析实验

一、实验目的

- 1、复习节点电压方程、节点导纳矩阵和阻抗矩阵的概念。
- 2、从计算精度、速度等方面，比较并验证牛顿-拉夫逊法、P-Q 分解法等潮流计算方法的优缺点和适用场合。
- 3、设计改进迭代效率的混合迭代方法。
- 4、学习 Clique 地理接线图格式潮流图程序的功能特点与使用方法，并演示接线图与计算结果的对应关系。

二、原理与说明

1、电力系统潮流计算

(1) 潮流计算基本概念

电力系统稳态分析指根据给定的网路结构、参数和决定系统运行状况的边界条件，求解电力系统的稳态运行状况，包括各母线电压、各元件通过的功率等。它是研究电力系统规划和运行方案最基本和最重要的手段，也是后续动态分析的基础。电力系统稳态分析包括潮流计算和静态安全分析两大部分。其中，潮流计算主要针对正常运行方式，静态安全分析主要针对个别元件退出运行后的情况。

潮流计算所需的数据包括以下几类：

① 拓扑后的网路结构：

- 节点：潮流计算中的节点是拓扑节点，与物理节点不同；
- 支路：节点间的连接关系，如线路，变压器等。

②参数:

- 线路参数：电阻、电抗、对地电导、对地电纳等；
- 变压器参数：铜损等值电阻、漏抗、激磁电导、激磁电纳、变比等。

③边界条件

- 指定的节点注入功率：有功/无功发电，有功/无功负荷等；
- 指定的节点电压：幅值、相角等。

其中，在节点电压幅值、相角，有功注入、无功注入 4 个状态量中，通常需要给定 2 个已知量，另外两个为直接待求量。直接待求量计算出来后，可根据设备参数进一步求解支路有功、支路无功、变压器有功、变压器无功、充电功率等间接待求量。

基本节点类型包括 V0 节点、PV 节点以及 PQ 节点三大类。其中，V0 节点又称为平衡机节点或者松弛节点，其电压幅值和相角（通常设置为 0° ）已知，需要求解节点的有功注入和无功注入。V0 节点需要提供不平衡功率，一般由大型发电厂的一台大型发电机承担。PV 节点的有功注入和电压幅值已知，需要求解节点的相角和无功注入。常见的 PV 节点为按照固定的有功出力和机端电压幅值发电的常规水电、火电等。PQ 节点的有功注入和无功注入已知，需要求解节点的电压幅值和相角。常见的 PQ 节点包括负荷节点（已知有功负荷和无功负荷）、T 节点和支路连接点（有功注入和无功注入均为零），以及按照固定的有功无功出力或者功率因数发电的小水电、新能源发电等。

(2) 潮流计算模型

潮流方程通常是节点功率平衡方程，每个节点包括有功方程和无功方程，共 2 个。

①极坐标形式的潮流方程

当节点电压以极坐标形式表示，即 $\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i$ 时，有

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

②直角坐标形式的潮流方程

当节点电压以直角坐标形式表示，即 $\dot{U}_i = e_i + jf_i$ 时，有

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

由于潮流方程只与节点相角差有关，与各节点相角绝对值无关，因此需要指定一个节点的相角作为参考相角，这个节点就是 $V\theta$ 节点。一般情况下一个同步网只有一个 $V\theta$ 节点。由于节点潮流方程显含 PQ ，因此可以去掉 $V\theta$ 节点的有功、无功平衡方程，方程组数量减 2；待方程组求解完成后，可直接计算出 $V\theta$ 节点的 P 和 Q 。

平衡节点是由于数值计算本身引入的，但它也有物理意义：潮流计算前网损未知，有功功率不可能平衡，因此需要至少有一台节点的有功注入 P 为未知，来承担不平衡功率，因此平衡节点一般选择负荷中心接入电压等级较高的大型发电机。

对于 PV 节点，由于该类节点的无功方程显含 Q ，因此可以去掉 PV 节点的无功方程，方程组数量减 1；待方程组求解完成后，可根据节点无功方程直接计算出 Q 。

对于 PQ 节点，有功无功方程需全部保留。

所有节点的潮流方程并列形成系统潮流方程组，潮流方程组是一个大规模

非线性方程组。假设系统节点数为 N ，平衡机节点只有 1 个，PV 节点个数为 R ，则潮流方程组阶数为 $2N-R-2$ 。潮流计算的本质是求解这个大规模非线性方程组。

(3) 潮流计算算法

主流的潮流算法有牛顿-拉夫逊法和 P-Q 分解法。

① 牛顿-拉夫逊法

首先，将潮流方程组写成 $f(x) = 0$ 的形式

$$P_i - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_i - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

设解的初值为 $x^{(0)}$ ，它与真值的误差为 $\Delta x^{(0)}$ ，则有 $f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = 0$ 。

将潮流方程 $f(x) = 0$ 在初值 $x^{(0)}$ 用泰勒级数展开，并略去二阶及以上的高阶项，得到

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) \approx f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})\Delta x^{(0)} \approx 0$$

可得

$$\Delta x^{(0)} = -\frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})}$$

利用上式得到 $x^{(0)}$ 的修正量 $\Delta x^{(0)}$ ，即可得到解

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)}$$

牛顿-拉夫逊法的本质是逐次线性化，反复形成并求解修正方程直到两次迭代解的差值 $|x^{(k+1)} - x^{(k)}|$ 小于精度限值 ε 。其迭代格式为

$$\begin{cases} \Delta x^{(k)} = -\frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \end{cases}$$

牛顿-拉夫逊法的优点包括收敛速度快、具有平方收敛特性、迭代次数与

系统规模基本无关，因此能求解大部分有病态条件的问题，并且利用了保持稀疏性技术，所需内存适中。其缺点也很突出，需要良好的初值，并且编程复杂，计算量较大。

②P-Q 分解法

P-Q 分解法利用电力系统特有的以下特性，对牛顿-拉夫逊法进行了简化。

- 有功主要与电压相角有关，忽略有功方程中电压幅值相关量；无功主要与电压幅值有关，忽略无功方程中电压相角相关量；
- $\cos \theta_{ij} \approx 0$; $G_{ij} \sin \theta_{ij} \ll B_{ij}$; $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}$;
- 将牛顿-拉夫逊法系数矩阵简化为在迭代中不变的定常矩阵。

P-Q 分解法一般用来在牛顿-拉夫逊法之前迭代几次，获得较好的初值后，再转用牛顿-拉夫逊法。

2、BPA 中指定计算过程的控制语句

指定计算过程的控制语句

/SOLUTION

该语句指定求解过程。此语句后跟有相应的第三级控制语句，用来指定该语句的具体功能。

两种与/SOLUTION\有关的第三级控制语句如下：

1) 用于指定计算方法和迭代次数：

>SOL_ITER, DECOUPLED= 2, CURRENT= 0, NEWTON= 30<
(number) (number) (number)

求解算法和迭代次数选择如下：

DECOUPLED: 即 P-Q 分解法，迭代次数的缺省值为 2。

CURRENT: 即改进的牛顿-拉夫逊算法，求解时也可以采用此算法开头，迭代次数的缺省值为 0。

NEWTON: 即牛顿-拉夫逊法，求解过程都以牛顿-拉夫逊法结尾，最大迭代次数的缺省值为 30。

牛顿-拉夫逊法是一种比较好的计算方法，收敛性比较好，但是对初值要求较高；PQ 分解法收敛速度较慢。通常情况下，首先采用 P-Q 分解法迭代几次，为牛顿-拉夫逊法提供较好的初值，然后再采用牛顿-拉夫逊法进行迭代，这样既可以解决牛顿-拉夫逊法的初值问题，又可以利用其收敛较快

的优点。

收敛性较好的潮流数据，可以不填写该控制语句，利用其缺省值进行潮流计算。对于收敛性较差的数据，一般应填写该控制语句，适当增大迭代次数限制。

适当增加 P—Q 分解法的迭代次数，大部分情况下可以提高潮流数据的收敛性。因此在潮流收敛性较差的情况下，可以采用适当调整 P—Q 分解法迭代次数的方法，改善潮流的收敛性。

2) 用于指定计算收敛的误差：

>TOLERANCE, BUSV= .005, AIPOWER= .005, TX= .005, Q= .005, OPCUT= .0001<

(number) (number) (number) (number) (number)

该语句指定收敛的允许误差值（标么值），包括节点电压、有功、无功等，通常采用缺省值。

例如：指定 P—Q 分解法的迭代次数为 10 次、牛顿—拉夫逊最大迭代次数为 30 次，则控制语句如下：

```
/SOLUTION\  
>SOL_ITER, DECOUPLED = 10, NEWTON = 30<
```

需要注意的是，/SOLUTION\控制语句及其后面的第三级控制语句必须填写在潮流数据中所有网络数据的后面，第一级控制语句(END)或(STOP)前面。否则，程序将出错。

3、 Clique 地理接线图格式潮流图程序介绍

(1) Clique 程序主要功能

Clique 地理接线图格式潮流图程序是一个电力系统分析软件的辅助工具，用于绘制地理图格式的潮流图画，主要由“厂站”（电厂、变电站及等值系统，以下简称站）和“连线”（输电线路、变压器和等值线路等）构成。该程序和 PSD-BPA 程序接口，使用 PSD-BPA 格式潮流数据文件构造系统的网络拓扑结构，而后在此拓扑结构的基础上进行作图。

Clique 地理接线图格式潮流图程序具有以下功能：

① 准自动作图

用户只需设定站中所包含的节点，将它拖到适当的位置即可构造一幅图形。

站之间的联系由程序自动搜索网络拓扑生成连线，并同时自动生成各种显示结果的标签。

② 方式套用

对于每个系统，一般都有若干个运行方式。将一个运行方式的图形套用其它运行方式的潮流数据时，该程序能根据新的潮流数据中的网络拓扑结构自动修改图形，保证图形和网络拓扑的一致性。如果用户有一个系统的大方式的图形，仅需少量修改甚至无需做任何工作就可以得到其它运行方式的潮流图形，大大地减少了用户绘图的工作量。

③ 标注数据

地理接线图中可以显示潮流计算结果、线路阻抗、线路名称和线路类型与长度。显示潮流结果时，可以选择为标么值或有名值，是否显示无功值，还可以显示节点的电压及角度。对于站，其中发电机出力可按名称顺序列表或累加形式输出，负荷按电压等级或全部累加的形式输出，无功补偿可以累加形式输出。

④ 灵活多样的说明

用户可以随意在图形上添加文字说明、图例和发电与负荷的统计信息。说明图形标注结果的类型及数据的单位的标签能根据图形显示的设置自动变化。

⑤ 图形编辑功能

站可以添加、删除、编辑、移动和合并，并能识别站的类型，用不同的图符加以区分。连接两个站之间的连线可根据连接两站之间支路的情况增加或合并，并可设定连线中所包含的支路元件。连线能识别电压等级、直流线路、并行线路等，并用线宽和图符表示。连线的拐点可以增加、删除和移动。

(2) Clique 程序调用拓扑关系

Clique 地理接线图格式潮流图程序的作图过程涉及到三个文件：图形文件、PSD-BPA 潮流数据文件和绘图用的潮流作图文件。在 PSD-BPA 潮流数据文件中需加入控制语句 /PF_MAP, FILE=*.MAP\, 在潮流计算完成后生成 .MAP 潮流作图文件。

这三个文件的关系如图 11-1 所示。 .dat 潮流数据文件用于构造图形的拓扑结构。打开或新建图形文件时，Clique 程序首先读取潮流数据文件中的网络拓扑关系，并构造网络拓扑结构对象；如果存在 .MAP 潮流作图文件，则将其读入拓扑对象；如果是打开图形，程序将读入图形数据，通过与拓扑对象进行对比修改图形，以保证图形和电网的拓扑结构一致。

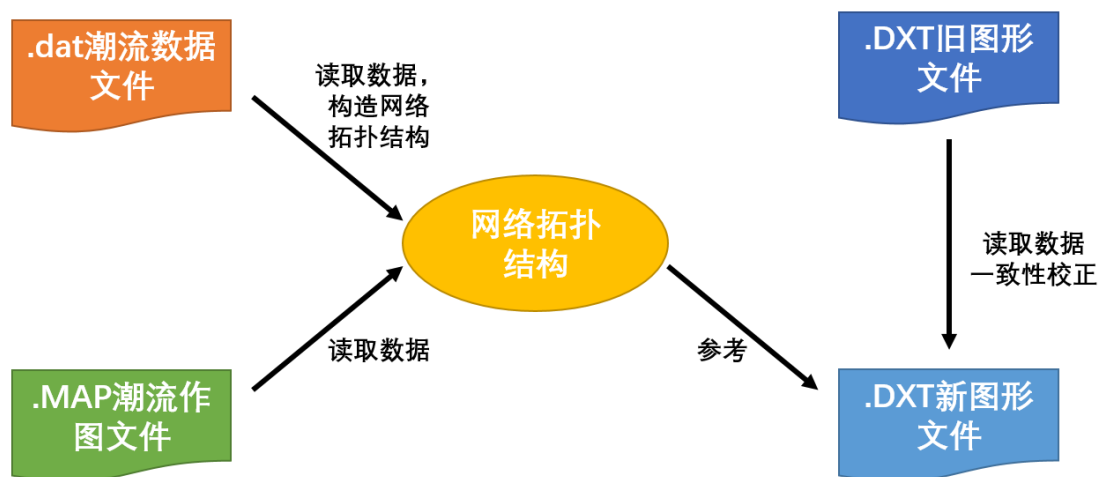




图 11-1 Clique 程序调用拓扑关系

(3) Clique 程序常用功能

①新建图形文件

在路径 D:\PSD\PSDEdit 点击  Clique 或者在 PSDEdit 集成界面点击工具栏的  图标，打开 Clique 程序界面，如图 11-2 所示。

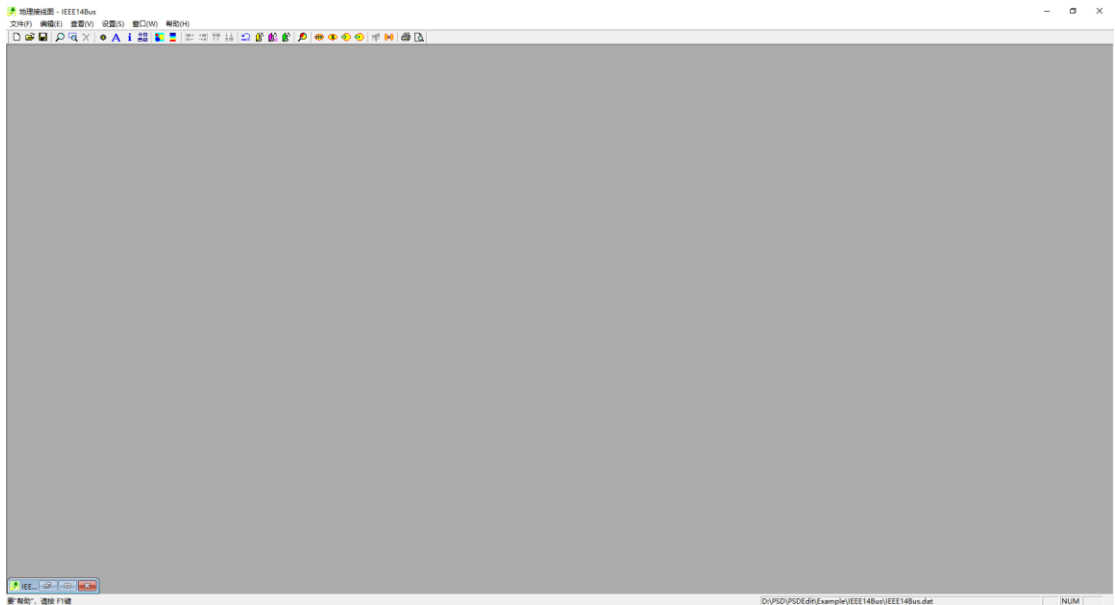



图 11-2 Clique 地理接线图格式潮流图程序界面

点击 Clique 程序界面左上角的  图标或选择主菜单“文件”→“新建”，在弹出对话框设置参考用的.dat 潮流数据文件并点击“确认”新建.DXT 文件，如图 11-3 所示。

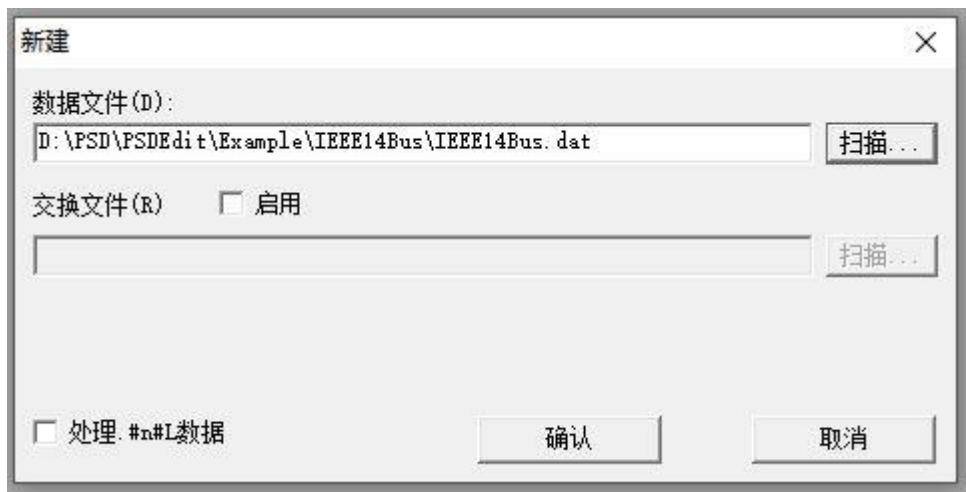



图 11-3 新建.DXT 文件对话框

②增加站

点击工具栏  图标或选择主菜单“编辑”→“增加站”，可以将单个站添加到绘图区。如果绘图区已经存在与该站相连的节点，将自动创建连线。

将鼠标移动到放置站的位置，按下鼠标的左键，如果鼠标击在空白处，且存在尚未画出的节点，就会显示站编辑器对话框，如图 11-4 所示。通过这个对话框来设定站中包含的节点、站的类型以及站的名称，以构造一个站。

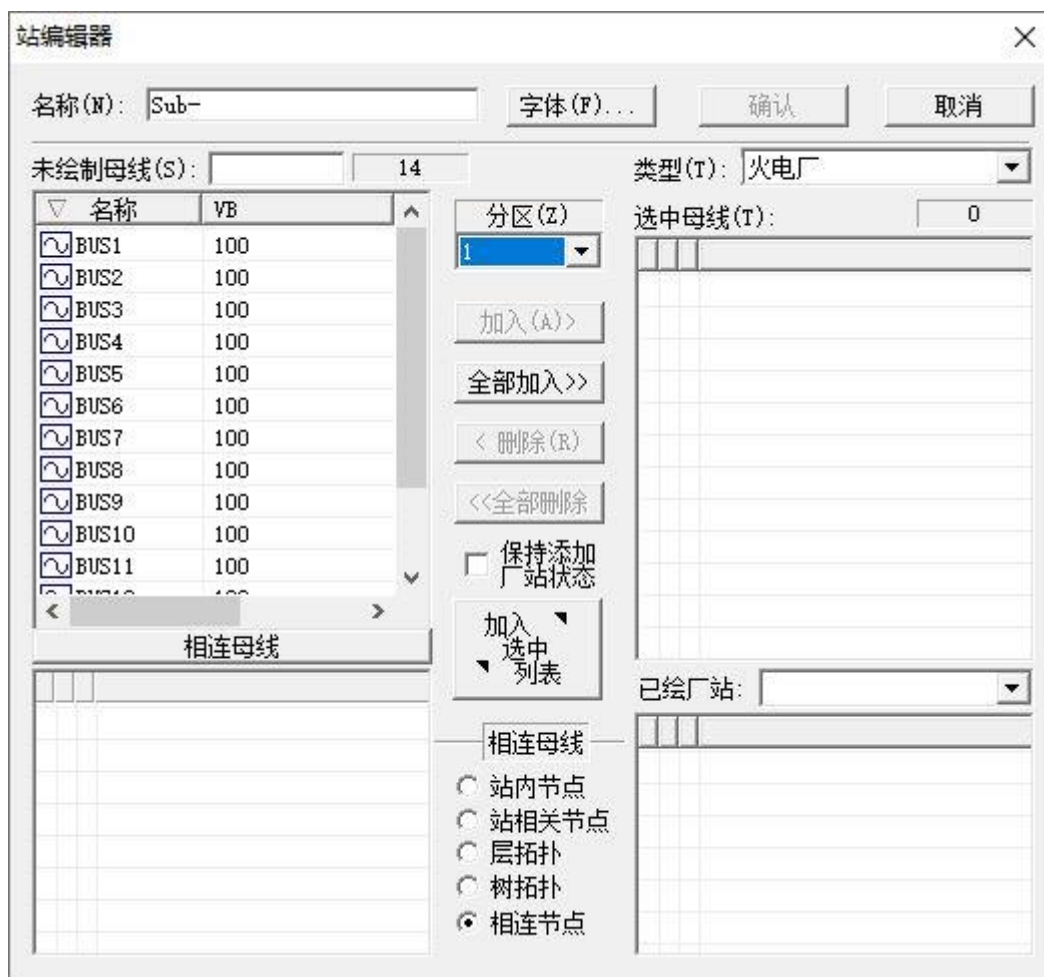




图 11-4 站编辑器对话框

③修改站

如果需要对某个站的属性进行修改，首先选中一个站，而后选择主菜单“编辑”→“对象管理”，或者先点击工具栏图标，然后用鼠标点击需要修改的站，显示上图的站编辑器对话框，可以向站中增加节点或从站中删除部分节点、修改站的名称、名称的字体、站的图符等。

④增加图例

点击工具栏图标或选择主菜单“编辑”→“增加图例”，为连接图增加图例。

在弹出的图例属性对话框（见图 11-5(a)）内，选择要显示的图符。如果用鼠标双击彩色图块，可在弹出的颜色对话框设置图形和字符的颜色。“边界”选项确定是否显示图例区域的边框。属性设置完成后，按下‘确定’按钮即可增加图例注释。然后用鼠标调整注释框的大小。图 11- 5(a)的输出结果如图 11- 5(b)所示。

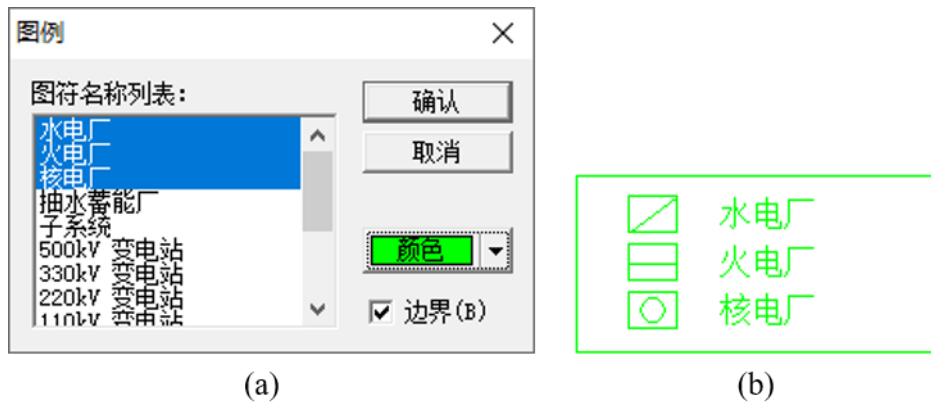




图 11-5 图例属性对话框及其输出结果

⑤删除对象

鼠标选中要删除的对象，工具栏  图标或主菜单“编辑”→“删除”变为激活状态。

点击工具栏  图标或主菜单“编辑”→“删除”或按下 Delete 键，将删除被选中的对象。如果删除的是站，与此站相关的连线和标签也会被自动删除。

连线及名称结果标签对象由程序维护，不允许被删除。

⑥设置潮流计算结果的显示属性

选择主菜单“查看”→“控制板”，在弹出的控制板对话框（见图 11-6）对连接图的潮流计算结果的显示属性进行设置。



图 11-6 结果显示控制板对话框

“图形类型”组用于设定显示的结果类型，包括潮流、阻抗、线路名称和线路类型等。设定完成后，图形下方的图形说明会根据图形的类型自动设定（禁止编辑）。显示阻抗时，阻抗值为标么值。站的结果标签和名称标签中的电压值，在显示阻抗结果时不显示。

“单位”组用于设定显示的潮流结果是标么值还是有名值。

“显示”组用于设定显示过滤器。“站名称”、“站结果”、“连线”和“连线数据”被选中，图形中相应的内容将显示，否则将隐藏。“电压的角度”被选中时，名称标签中将在潮流图中显示电压的幅值和角度，否则只显示电压的幅值。“潮流的无功”

被选中时在潮流图中显示有功和无功；未被选中时，只显示有功部分。“导纳”用于阻抗图；未选中时，只显示 $Z:R+jX$ ；选中时，除显示 $Z:R+jX$ 外，还要显示线路的导纳 $Y/2:G/2+jB/2$ 。“所有节点电压/自定义”用于潮流图，选中时显示站中所有节点电压，否则只显示指定的站的节点电压。

当“图形类型”和“单位”选择发生变化时，图形和数据单位的说明标签自动变化，详见表 11-1。

表 11-1 图形说明标签与设置对照表

图形类型	单位	说明标签
潮流	有名值	潮流图 (单位: kV、MW、Mvar)
	标么值	潮流图 (单位: 标么值)
阻抗		阻抗图 (单位: 标么值)

三、实验项目和方法

1、实验系统介绍

图 11-7 为实验系统接线图。该系统为 100kV 输电线路，系统包括 69 台发电机，304 条输电线路以及 195 个负荷。

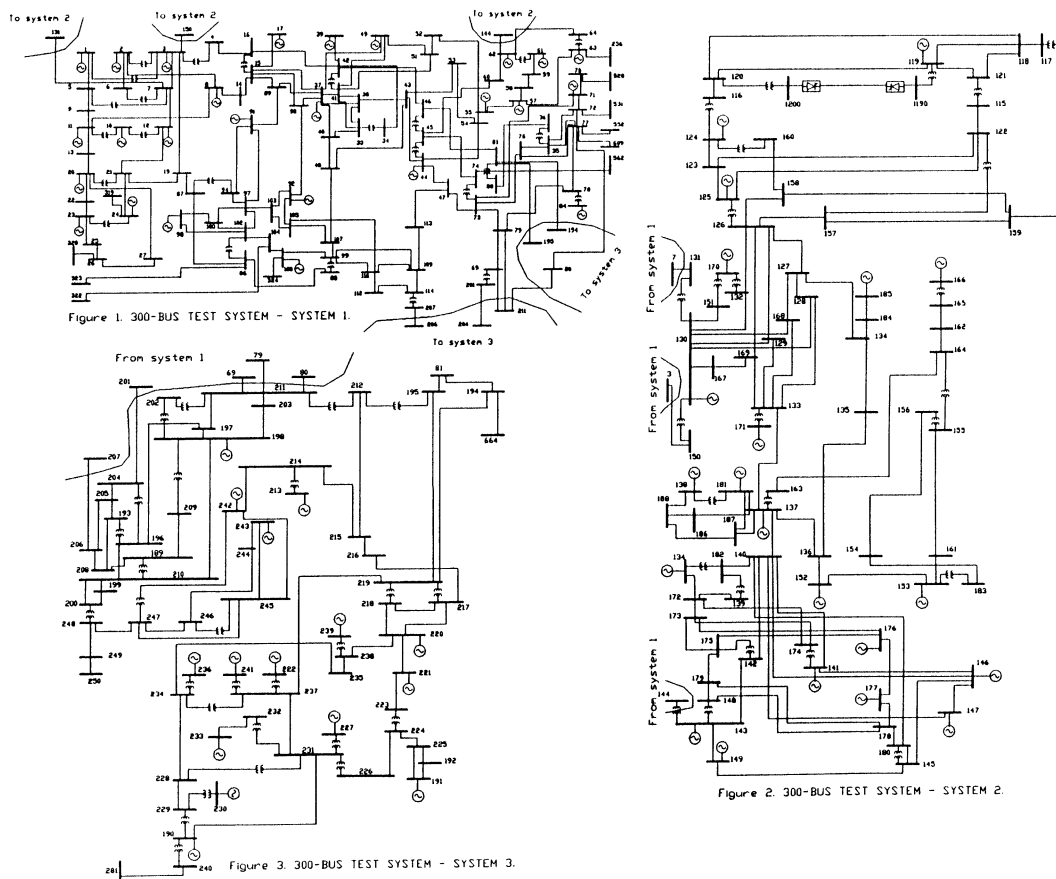


图 11-7 实验系统接线图
系统参数见 IEEE300Bus.dat 潮流数据文件。

2、潮流算法对比

(1) 打开 IEEE300Bus.dat 潮流数据文件，在网络数据后添加控制语句指定潮流求解过程为：只使用牛顿-拉夫逊法，最多迭代次数为 30 次。将该控制语句复制到下面的方框里：

执行潮流计算，将 .pfo 潮流计算结果文件的计算过程迭代信息表复制到下面的方框里：

实际迭代次数为：P—Q 分解法迭代__次，牛顿—拉夫逊法迭代__次。

(2) 将计算收敛的误差调整为：有功.000001（标么值），无功.000001（标么值）。将该控制语句复制到下面的方框里：

执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的计算过程迭代信息表复制到下面的方框里：

实际迭代次数为：P—Q 分解法迭代__次，牛顿—拉夫逊法迭代__次。


(3) 在(2)的基础上，将潮流求解过程指定为P—Q分解法的迭代2次、牛顿—拉夫逊法最多迭代30次。将该控制语句复制到下面的方框里：


执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的计算过程迭代信息表复制到下面的方框里：

实际迭代次数为：P—Q 分解法迭代__次，牛顿—拉夫逊法迭代__次。

3、Clique 程序作图

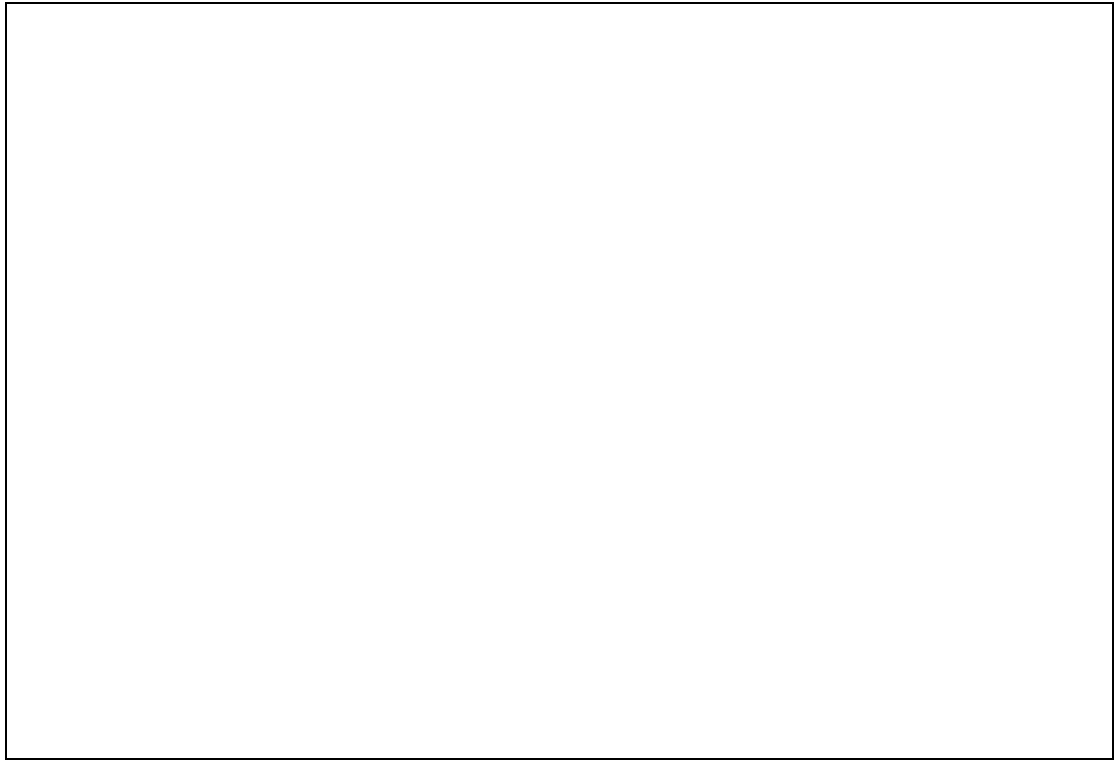
(1) 新建一个以 IEEE14Bus.dat 潮流数据文件为参考的图形文件。

(2) 点击工具栏  图标或选择主菜单“编辑”→“增加站”，逐次将单个站添加到绘图区。

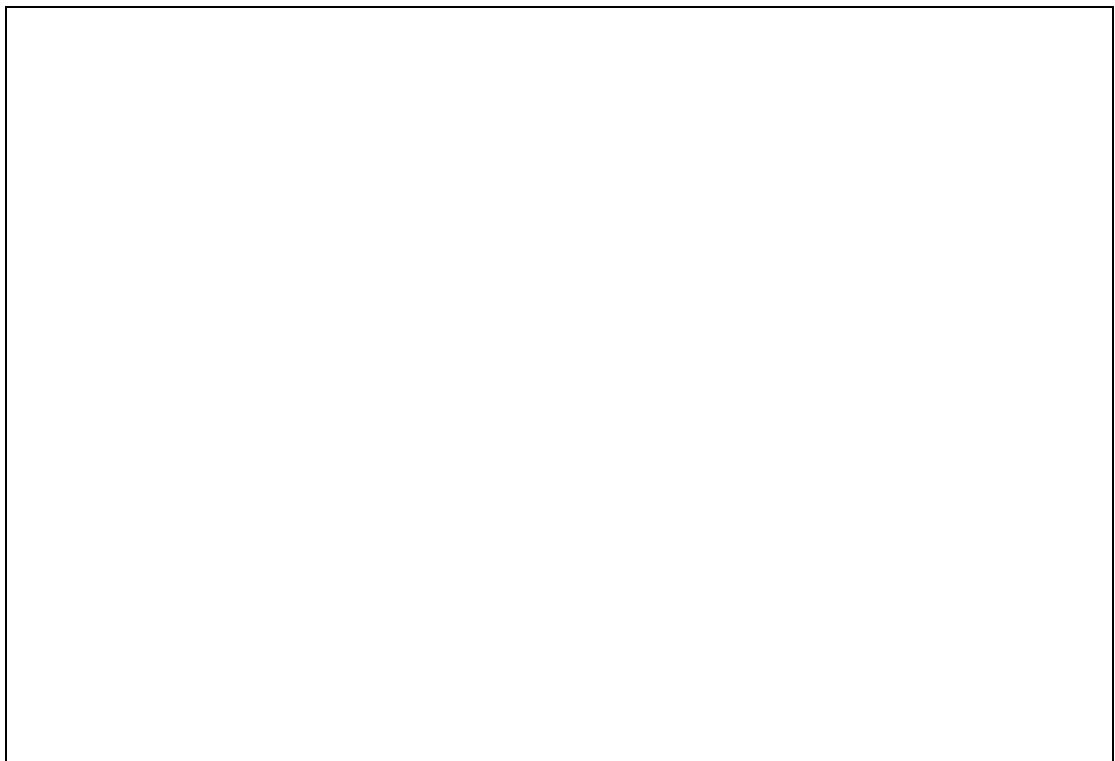
(3) 点击工具栏  图标或选择主菜单“编辑”→“增加图例”，为连接图增加“火电厂”、“110kV 变电站”图例。

(4) 选择主菜单“查看”→“控制板”，在弹出的控制板对话框（见图 7-X）对连接图的潮流计算结果的显示属性进行设置。

①选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，将接线图粘贴到下面的方框里：



②选择“阻抗”图形类型，单位设置为“标么值”，将接线图粘贴到下面的方框里：



四、分析与思考

1、电力系统潮流计算方法有哪些？其原理是什么？各有什么特点？请结

合实验结果进行阐述。

- 2、如何设计改进迭代效率的混合迭代方法？
- 3、Clique 程序绘图有哪些注意事项？
- 4、实验过程中遇到哪些问题，如何解决？有哪些实验收获？

第十二章 电力系统电压控制实验

一、实验目的

- 1、复习电力系统电压控制的方法。
- 2、通过实验理解应用发电机调压、改变变压器变比调压、应用无功功率补偿装置调压的原理和方法。

二、原理与说明

1、电压控制的必要性

电压是衡量电能质量的基本指标之一，是反映电力系统无功功率平衡和合理分布的标志。

电压控制，即调节电力系统的电压，使其变化不超过规定的允许范围，以保证电力系统的稳定水平及各种电力设备和电器的安全、经济运行。

我国国家标准 GB/T 12325-2008《电能质量 供电电压偏差》规定了供电电压偏移的允许范围。

2、电压控制的方法

(1) 发电机调压

在各种调压措施中，最直接最经济的手段是利用发电机调压。这是一种不需要额外投资的调压手段，所以应当优先考虑采用。发电机调整端电压是通过调节励磁从而改变无功功率出力来实现的。现代的同步发电机可在额定电压的 95%~105% 范围内保持以额定功率运行，即发电机保持同样出力的情况下，可以在 10% 范围内调节电压。

在发电机不经变压器升压直接向用户供电的简单系统中，如果线路较短、线路上电压损耗较小，一般只需要通过改变发电机励磁，改变其母线电压就可以将电压调整到合适的范围。但是复杂电力网络例如发电机经过多级变压器变换电压向远方供电的情况下，末端电压随着负荷的改变可能产生 20%左右的电压变化，单靠发电机调压显然不能保证这部分用户的电能质量。因此可采用其他调压方式共同调节网络电压。

(2) 改变变压器变比调压

双绕组变压器的高压绕组和三绕组变压器的高中压绕组一般都有若干个分接头可供选择，通过选择不同的分接头，改变变压器变压比例，可实现调压的目的。在无功充裕的系统中，运用各种类型的有载变压器调压既方便又有效。中低压配电网中因为输电线路电阻较大，通过无功功率调压往往效果不够理想，不得不采用具有分接头的有载调压变压器。需要注意的是，只有当系统无功功率充足时，用改变变压器变比调压手段才有效；当系统无功不足时，必须首先增设无功补偿设备，再使用改变变压器变比调压手段。若在无无功功率不足的情况下时调节变压器分接头强行升压，则可能引起整个系统电压的“崩溃”。因为节点电压平方与无功功率成正比，若该节点电压上升，则该节点所需要的无功功率会更多，导致整个系统的电压继续下降，最终导致整个系统电压“崩溃”。

(3) 应用无功功率补偿装置调压

当系统中无功功率不够充足时，需要考虑运用各种无功功率补偿设备进行调压。这些补偿设备可分为两类，即串联补偿和并联补偿。所谓串联补偿就是指串联电容器补偿，但是串联补偿电容器由于设计、运行等方面的原因，

实际应用较少。并联补偿指并联电容器、调相机和静止补偿器。并联电容器的优点包括：①电容器可以根据需要连接成组，可以分组集中使用，又可以分散安装，就地提供无功，从而减少线路功率损耗和电压损耗；②电容器还可以做到随电压波动分组投切；③电容器运行损耗小，投资费用低。因此，电容器是电网中应用最普遍的无功补偿设备。并联电容器也有缺点。电容器只能发出感性无功功率以提高节点电压，不能吸收无功功率来降低节点电压，因此，在低负荷时，应当切除节点上的部分乃至全部电容器。并联电抗器的应用与并联电容器类似。调相机的优点包括：①其调压方式是借改变其励磁电流的大小来改变其供出或吸收的感性无功功率，既可以发出无功功率也可以吸收无功功率；在负荷较大时，可以过励磁运行发出无功功率，在负荷较小时，可以欠励磁运行吸收无功功率；②可以通过调节调相机励磁，平滑地改变其无功功率的大小和方向，因此可以平滑地调节电压；③调相机还可以装设自动励磁调节装置，在电力系统电压变化时自动增减无功出力以维持系统电压，这对于提高电力系统运行的稳定性是有益的。调相机缺点包括：①调相机的有功功率损耗比较大，在满负荷运行的情况下，有功功率损耗可以占到其额定容量的 1.5%~5%，而且调相机容量越小，有功损耗所占比重越大；②调相机是旋转设备，运行的维护量比较大。静止补偿器是一种可控的动态无功补偿装置，其特点是将可控的电抗器与电容器并联使用，电容器发出无功，可控电抗器则可以吸收无功功率，根据无功负荷的变化情况进行调节，以保持母线电压的稳定。

三、实验项目和方法

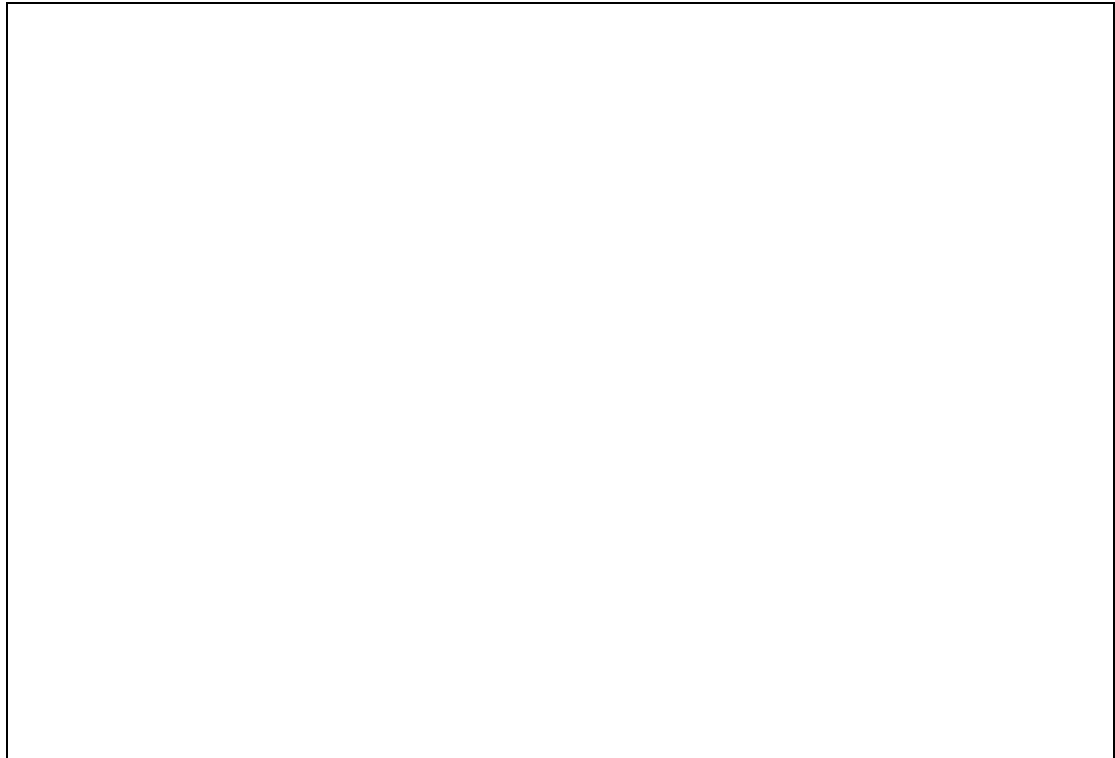
1、改变变压器变比调压

(1) 打开 IEEE14Bus.dat 潮流数据文件，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：

选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：

(2) 将节点 4 和节点 7 之间的变比调整为 1:1，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：

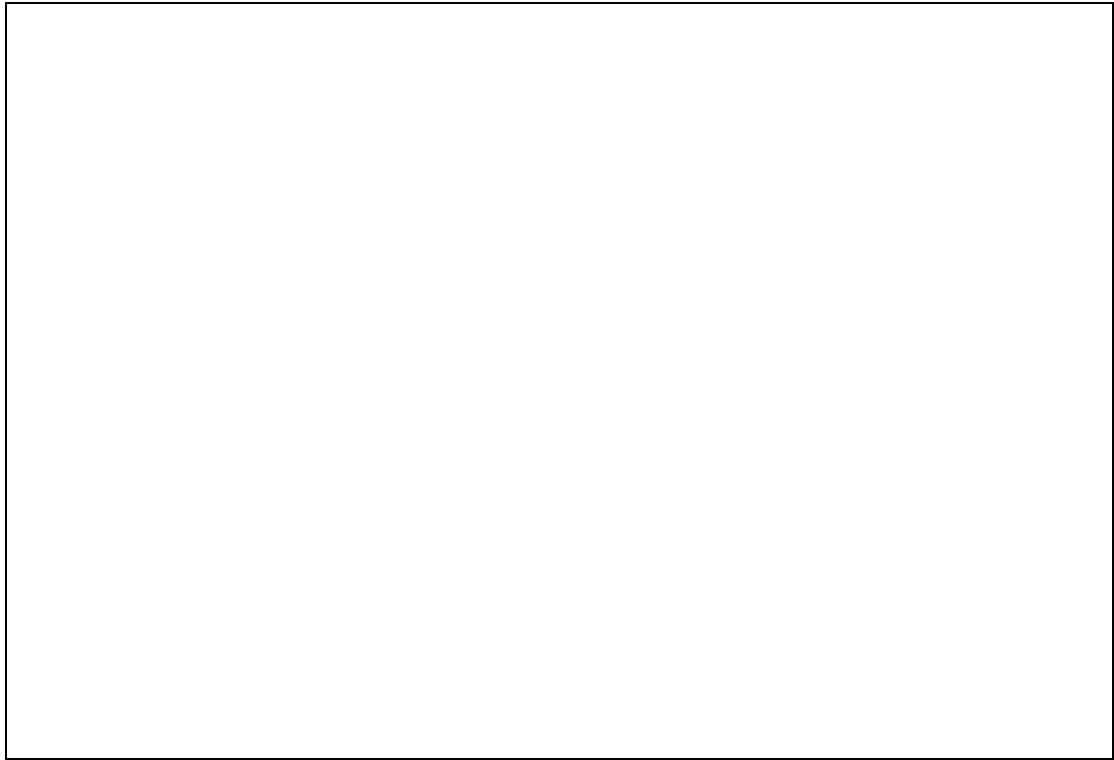
选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：



2、应用发电机调节电压

(1) 将节点 4 和节点 7 之间的变比调整回 0.978:1，将节点 2 的电压调整为 1.035pu，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：

选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：



(2) 将节点 2 的电压调整为 1.055pu，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：



选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：



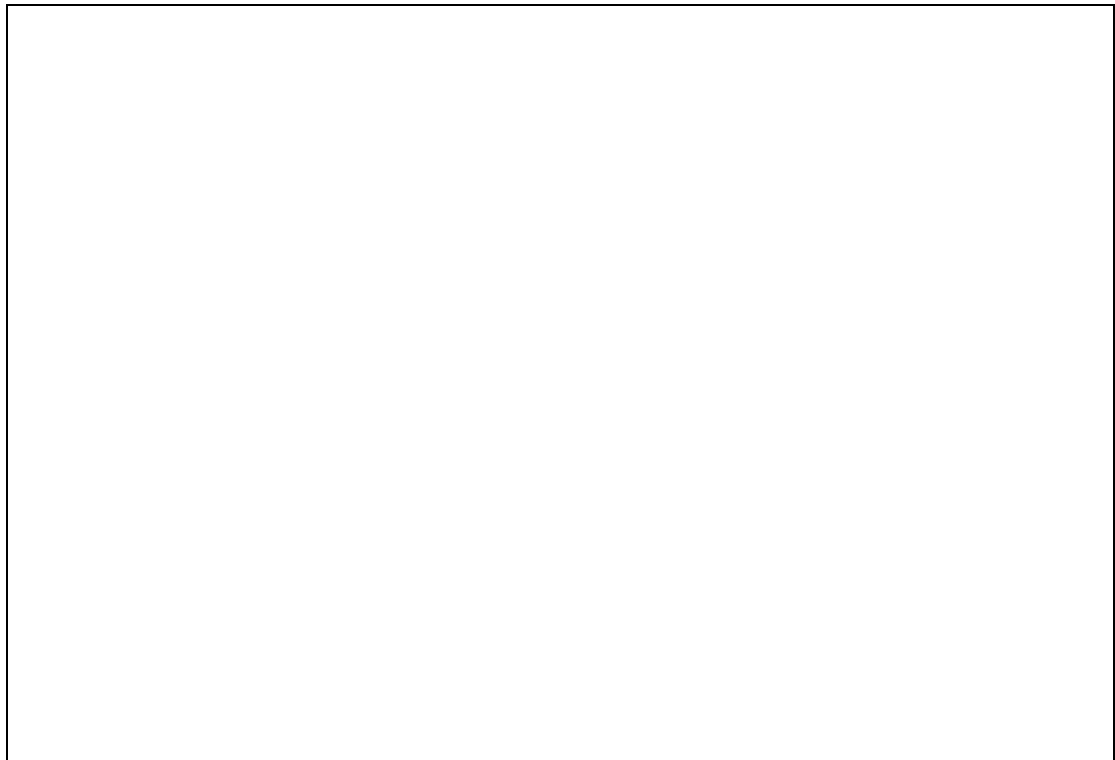
(3) 维持节点 2 的电压为 1.055pu，将节点 2 发电机的无功容量调整为 100Mvar，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：

选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：

3、应用并联电容器调节电压

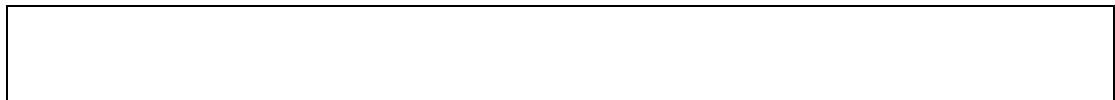
维持节点 2 的电压为 1.055pu，在节点 2 增设容量为 50Mvar 的电容器，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：

选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：



4、应用并联电抗器调节电压

将节点 2 的电压调整回 1.045pu，即在原始网络的基础上，在节点 12 增设容量为 10Mvar 的电抗器，执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：



选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：



5、电压调节综合实验

打开 IEEE14BusComp.dat 潮流数据文件，综合运用各种电压调节手段，将各节点电压调整到 0.95pu~1.05pu 范围内。

请将所使用的电压调节手段填写到下面的方框里：



执行潮流计算，将.pfo 潮流计算结果文件的节点相关数据列表复制到下面的方框里：



选择“潮流”图形类型，单位设置为“有名值”，勾选“所有节点电压/自定义”选项，将接线图粘贴到下面的方框里：



四、分析与思考

- 1、将变压器 4-7 的变比改为 1:1 后,网络各节点电压发生了怎样的变化?请解释其原因。
- 2、将节点 2 的发电机电压降低为 1.035pu 后,网络各节点电压发生了怎样的变化?请解释其原因。
- 3、将节点 2 的发电机电压提升至为 1.055pu 后,网络各节点电压发生了怎样的变化?请解释其原因。
- 4、请结合实例阐述发电机调压的原理及限制条件。
- 5、请结合实例阐述如何使用电容器、电抗器等无功功率补偿装置调节电压。
- 6、实验过程中遇到哪些问题,如何解决?有哪些实验收获?

附录：

1、IEEE14BusComp.dat 潮流数据文件

将修改后的 IEEE14BusComp.dat 潮流数据文件复制到下面的方框里：

