



同济大学本科教材出版基金资助

电力系统数字仿真与实验

主 编 张文豪
副主编 张明锐 易 俊



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济大学本科教材出版基金资助

电力系统数字仿真与实验

主 编 张文豪

副主编 张明锐 易 俊



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书内容涵盖了电气工程、电力系统继电保护、电力系统调度自动化等多个领域,实验形式有仿真实验和现场实验两类,其中包含电力系统稳态分析、电力系统暂态分析、电力系统机电保护、电力系统自动化等多类实验项目。仿真实验包含基于 ETAP 软件的电力系统仿真和基于 PowerWorld Simulator 的电力系统仿真,适合具备电力系统类课程基础知识的学生学习与开展研究;现场实验包含电力系统调度自动化实验和电力系统继电保护实验,为学生提供了电力系统物理模拟实验环境。

本书可作为电力系统相关专业的本科生、研究生教材,也可作为电力行业技术人员培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统数字仿真与实验 / 张文豪主编. —上海:
同济大学出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-5608-6198-2

I. ①电… II. ①张… III. ①电力系统—系统仿真
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 054134 号

电力系统数字仿真与实验

主 编 张文豪

责任编辑 朱 勇 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 大丰科星印刷有限责任公司

开 本 710mm×960mm 1/16

印 张 6.75

字 数 135 000

版 次 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6198-2

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

由于电力系统结构和运行特性的特殊性及其复杂性,很多理论不能直接应用于实践检验,且电力系统及其自动化相关实验开展较为困难。复杂系统孵化了仿真技术,电力系统仿真软件近年来不断出现,对于理解电力系统复杂工程问题、发现复杂现象所蕴含的问题本质、寻找新的解决方法和优化方法、提升实践能力和水平等发挥了十分重要的作用,仿真成为理论研究和科学实验的有益补充。

本书所呈现的电力系统实验形式包含仿真实验和现场实验,内容涵盖了电力系统分析、电力系统调度自动化、电力系统继电保护等多个领域。

第一章概论,简要介绍了本书内容及实验的相关要求。

第二章基于 ETAP 软件的电力系统仿真,设置了电力系统建模、潮流计算、短路故障、暂态稳定、继电保护配置五个实验。

第三章基于 PowerWorld Simulator 的电力系统仿真,设置了潮流计算、故障分析、静态安全分析三个实验。

第四章电力系统调度自动化实验,包含电力系统的本地调控、遥信量与遥测量测量两个实验。

第五章电力系统继电保护实验,采用天煌科技实验平台,设置了三个典型的电流继电器、时间继电器及三段式电流保护实验。

本书的仿真实验内容选取了典型的电力系统分析案例,由浅入深,方便学生学习领会;采用两种不同类型的仿真软件,有利于进行对比分析,有助于学生加强对现代仿真工具的掌握。实验部分充分利用现有实验设备,开设了多组典型

实验,对提高学生动手能力、增强学生工程实践能力具有较好的作用。本书内容丰富,图文并茂,实验过程清晰,有助于增强学生对电力系统的理解和认知。

本书由张文豪、张明锐、易俊编写,其中第一章至第三章由张文豪编写,第四章由张明锐编写,第五章由易俊编写,全书由张文豪统稿。ETAP 公司和天煌教仪为本书编写提供了很多支持,在此表示感谢。由于作者水平有限,书中若有疏漏与不足之处,敬请同行与读者不吝赐教。

编 者

2019.2

目 录

前 言

第一章 概 论	1
第二章 基于 ETAP 软件的电力系统仿真	2
实验一 基于 ETAP 建立简单电力系统模型	2
实验二 基于 ETAP 的电力系统潮流计算	15
实验三 基于 ETAP 的电力系统短路故障仿真分析	19
实验四 基于 ETAP 的电力系统暂态稳定分析	25
实验五 基于 ETAP 的电力系统继电保护配置	30
第三章 基于 PowerWorld Simulator 的电力系统仿真	35
实验一 基于 PowerWorld Simulator 的电力系统潮流计算	35
实验二 基于 PowerWorld Simulator 的故障分析	48
实验三 基于 PowerWorld Simulator 的静态安全分析	56
第四章 电力系统调度自动化实验	65
实验一 电力系统的本地调控	65
实验二 遥信量与遥测量的测量	70

第五章 电力系统继电保护实验	82
实验一 电磁型电流继电器整定测试	82
实验二 电磁型时间继电器整定测试	86
实验三 单侧电源辐射式输电线路三段式电流保护整定测试	92
附录一 5 节点系统	100
附录二 实验注意事项	102

第一章 概 论

电力系统系列课程包含电力系统分析(电力工程)、电力系统继电保护、电力系统调度自动化等,涉及电力系统元件与结构、潮流计算、短路分析、静态安全分析、继电保护整定与配置、调度与控制等内容,是电气工程及自动化专业课程体系的重要组成部分。通过电力系统系列仿真与现场实验使学生能够了解和掌握电力系统的有关理论、性能和运行特性,并通过实验对理论进行验证,深化对电力系统基本理论的认识,为从事电力系统及其自动化的管理、调度、运行、设计、研制等工作打下必要的专业知识基础。

本书分为仿真实验和现场实验两大部分。仿真实验主要包含基于 ETAP 软件的电力系统仿真实验和基于 PowerWorld Simulator 的电力系统仿真实验,适合具备电力系统类课程基础知识的学生学习并开展研究;现场实验包含电力系统调度自动化实验和电力系统继电保护实验,为学生提供了电力系统物理模拟实验环境。本书有助于加强学生对电气类现代实验工具和仿真工具的使用,结合实际,侧重于目前现场真正应用的技术,缩小理论与实际的差距,在掌握基本概念和基本方法的基础上,锻炼学生的动手能力,培养学生具有创新性科学研究能力和知识创新能力。

实验报告的基本要求如下:

- (1) 写明实验名称、专业、班级、姓名、实验日期等。
- (2) 扼要地写出实验目的、实验内容。
- (3) 简述实验过程中遇到的问题及解决方法。
- (4) 根据实际上机操作,结合教师上课讲授的内容,写出心得体会。
- (5) 实验后要求每人独立完成一份实验报告。实验报告要简明扼要,字迹清楚,并按时送交教师批阅。

第二章 基于 ETAP 软件的 电力系统仿真

实验一 基于 ETAP 建立简单电力系统模型

一、实验目的

在利用 ETAP 进行电力系统分析时,统一利用单线图来表示实际的三相输电线路,以便图形化地显示电力系统。本实验要求同学们在掌握电力系统的结构组成,了解电力系统的主要参数的基础上,通过上机实际操作,熟悉 ETAP 电力系统仿真软件的基本操作,熟悉各个系统模块的基本功能,学会单线图模型的搭建、参数的输入及仿真模块的选择,并在此基础上用 ETAP 根据附录一提供的 5 节点系统建立模型。

二、实验内容

1. 软件的安装

ETAP 是电力电气分析、电能管理的综合分析软件系统的简称。ETAP 是一款功能全面的综合型电力电气分析计算软件,能为发电、输配电和工业电力电气系统的规划、设计、分析、计算、运行、模拟提供全面的分析平台和解决方案,其研发公司为美国 OTI 集团。

OTI 集团推出的离线仿真分析软件 ETAP PS,包括潮流分析、短路计算、电动机加速分析、谐波分析、保护设备配合和动作序列、暂态稳定、弧闪保护分析、接地网系统、电缆载流量和尺寸、传输线弧垂张力和容量计算、变压器容量估计和分接头优化、蓄电池放电分析和容量估计、发电机启动、自定义动态模型、可靠

性评估、优化潮流、补偿电容器最佳位置、不平衡潮流、地理信息系统图、高压直流连接、风力发电机、光伏太阳能等功能模块。

ETAP 仿真软件对于电脑的硬件和软件均有比较高的要求,除了当前电脑一般都具备的功能之外,在软件上还有如下要求: Microsoft .NET Framework v3.5 (SP1); Microsoft SQL Server Compact 3.5 (SP2)。配置好待安装的电脑之后,即可以启动 ETAP Installer 进行安装,安装界面如图 2.1 所示,具体过程可以参照用户指南。需要注意的是,ETAP 有单机版和网络版,同时输出报告的支持语言可以选择。



图 2.1 ETAP 12.6 Installer

2. ETAP 软件的基本操作

可以通过下拉菜单栏或快捷菜单新建工程,如图 2.2 所示。

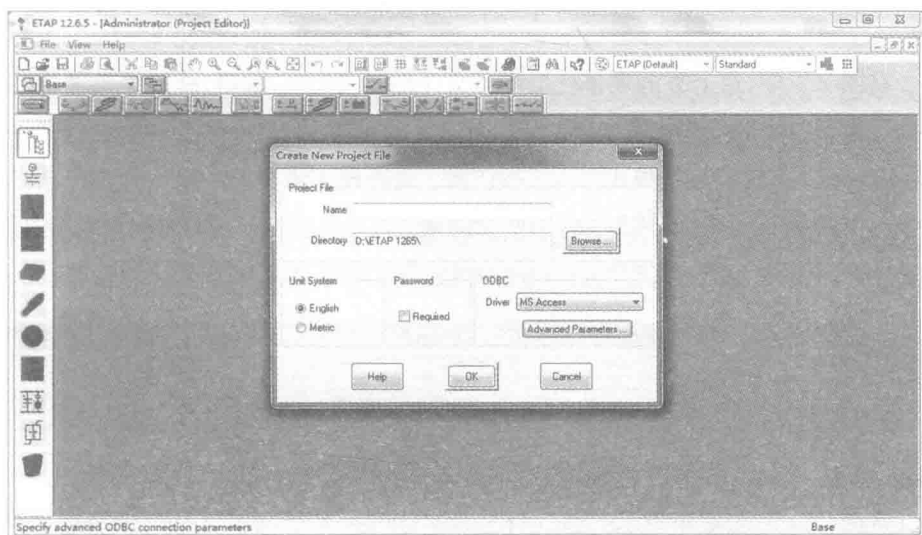


图 2.2 新建工程

该程序的软件界面主要分为工具栏和作图区域两部分,如图 2.3 所示。

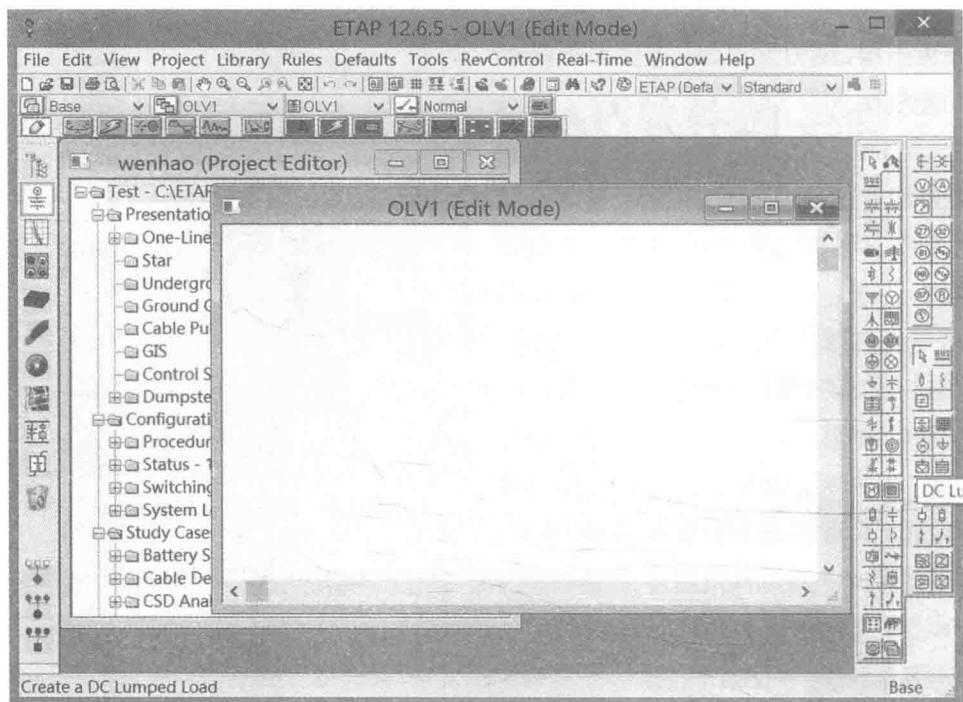


图 2.3 ETAP 软件界面

在图 2.4 中,最上方的菜单栏提供了文件创建与保存、编辑、缩放等多种功能。第二行为菜单栏的一些快捷操作。第三行为系统结构。第四行为运行模式选择,可以在编辑模式和多种运行模式之间进行切换。运行模式依次为:编辑;潮流分析;短路分析;电动机启动分析;暂态稳定分析;保护配合;直流潮流;直流短路分析;蓄电池容量分析;不平衡潮流;最优潮流;可靠性评估;最优电容器配置;投切顺序管理。



图 2.4 菜单栏与快捷工具条

绘图区域左侧的工具条如图 2.5 所示,可以很方便地在不同的系统之间进行切换。

切换运行模式到编辑模式,或选择图 2.5 中的单线图,右侧会出现元件库,如图 2.6 所示。编辑模式下可以实现元件的选择、拖拉、复制、删除、连接、元件参数修改等操作。

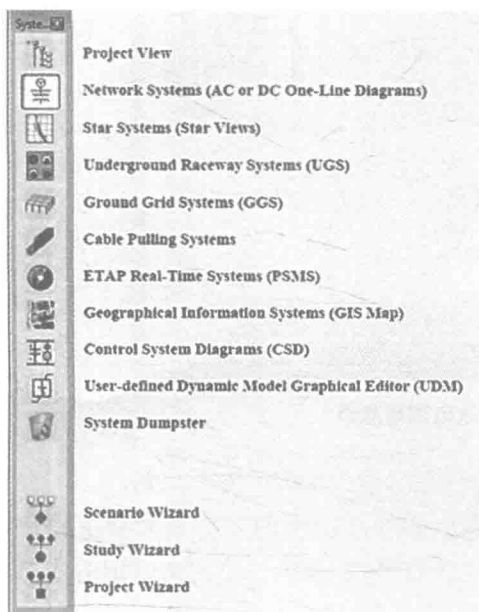


图 2.5 不同系统切换工具条



图 2.6 编辑模式下的模式工具条

3. 建立简单电力系统模型

下面的内容主要介绍建立电力系统模型过程中各元件的需求数据。

1) 等效电网

等效电网包含了多类参数。一般情况下需要录入参数的属性页有信息页(Info)、额定值页(Rating)。

(1) 信息页: 选择合适的模式,界面如图 2.7 所示,需要注意模式(Mode)即节点类型。

节点类型包含四类,如图 2.7 中右下侧所示。

① 平衡节点(Swing): 等效电网终端的电压大小和相角由用户指定,输出的有功和无功根据计算得到。注意,系统中至少要有有一个平衡节点。

② 电压控制(Voltage Control): 等效电网输出的有功和电压大小由用户指



图 2.7 等效电网信息页

定,无功和相角由计算得到。即作为 PV 节点,参与系统的电压控制。

③ 无功控制(Mvar Control): 等效电网终端输出的有功和无功由用户指定,电压大小和相角由计算得到。即作为 PQ 节点,模拟一个出力恒定的电源或容量恒定的负荷。

④ 功率因数控制(PF Control): 等效电网终端输出的有功和功率因数由用户指定,电压大小和相角由计算得到。功率因数控制模式与无功控制模式类似。

(2) 额定值页: 如图 2.8 所示,根据节点类型的不同会出现不同的输入界面。

① 额定电压(Rated kV): 电网额定电压,一般指电压等级。

② 发电类型(Gen. Cat.): 在这里定义等效电网不同发电类型用于不同方案的潮流计算,即指定不同的运行值。不同模式下,可指定的数据(白色显示部分)不同。平衡节点模式,输入值为 $\%V$ 和相角 Vangle;电压控制模式下输入 $\%V$ 和有功 MW;无功控制模式下输入无功 MW 和无功 Mvar;功率因数控制模式输入有功 MW 和 $\%PF$ 。

多个等效电网的参数设定可以通过最下方的下拉条直接进行切换。

2) 母线

母线主要用于两条支路或电机与一条支路之间的连接。母线同样包含很多参数,必要的输入在信息页(Info),如图 2.9 所示,仅需填写标称电压。

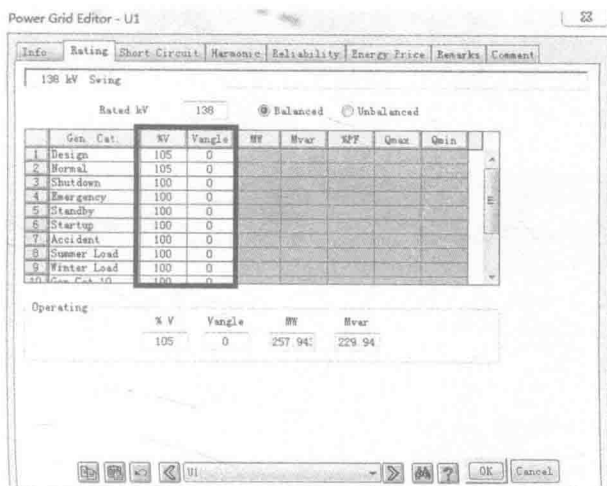


图 2.8 等效电网的额定值设置

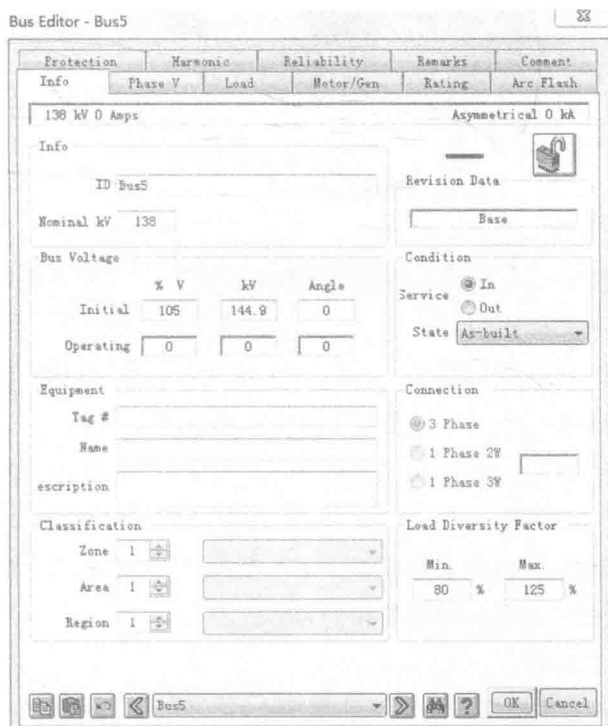


图 2.9 母线信息页

同时,若该母线不是电机的控制装置,或在单线图中无需特殊强调,则可将母线符号由条状改为点状,如图 2.10 所示。需注意的是,修改为节点后不再显示潮流计算信息。

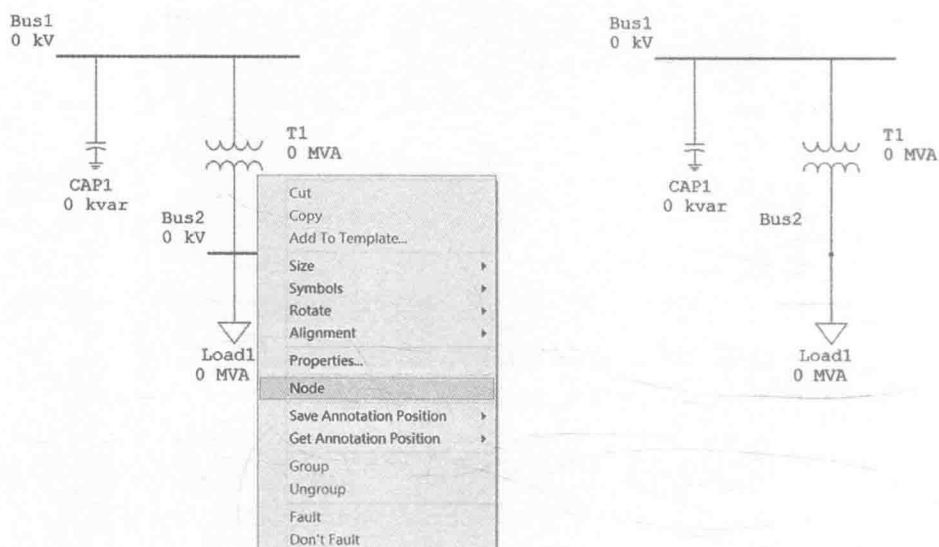


图 2.10 母线与节点形态转换图

3) 同步发电机

同步发电机模块需要录入参数的属性页主要有信息页和额定值页,建模时注意发电机与等效电网的区别。

(1) 信息页(Info): 如图 2.11 所示,选择发电机的运行模式。一般发电机推荐选择电压控制,如系统中只有发电机供电推荐平衡节点。

(2) 额定值页(Rating): 如图 2.12 所示,需要录入的参数是额定功率、额定电压、功率因素和效率。

值得注意的是,在信息页选择哪种运行模式,在该页发电种类栏则需填写相应的数据,对应的可编辑的数据项底色为白色。

4) 双绕组变压器

变压器是电力系统建模最常见的模块之一。在 ETAP 系统中,该模块必须录入参数的属性页为额定值页、阻抗页,可能用到的有分接头页。



图 2.11 同步发电机的信息页图

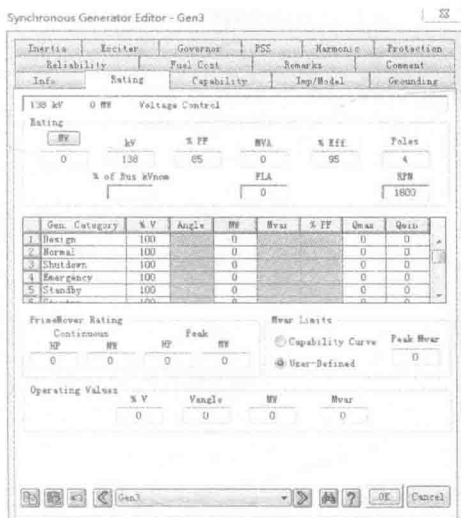


图 2.12 同步发电机的额定值设置

(1) 额定值页(Rating): 双绕组变压器需填写一次侧和二次侧的额定电压(单位: kV)、额定容量(单位: MVA 或 kVA),如图 2.13 所示。

(2) 阻抗页(Impedance): 需要填写变压器的正序短路电压百分数 $\%Z$ (额定变比下),正序阻抗的电抗电阻比 X/R 值取典型值,如图 2.14 所示。值得注意的是,此处的阻抗百分数 $\%Z$ 与变压器的额定容量相关。



图 2.13 双绕组变压器的额定值



图 2.14 双绕组变压器的阻抗设定

(3) 分接头页(Tap)：输入固定分接头档位(% Tap/kV Tap),推荐在潮流分析后再根据结果设置档位。如果是 LTC,请选中图 2. 15 中的 AVR,然后点击 LTC 按钮进行设置。



图 2. 15 变压器分接头设置

点击%Tap 和 LTC 可以打开其设定页,如图 2. 16 所示。Tap 设定页可以输入变压器分接头设置的百分比,或者点击该按钮让它显示“kV”,然后输入该变压器分接头的设置(kV)。ETAP 可以模拟固定分接头转换开关通过单击向上、向下按钮把分接头值设为-5. 0%, -2. 5%, 0, 2. 5%或 5. 0%。LTC 页为电压调节器的设定。变压器带载调压分接头按钮：当相关的复选框被选中时,变压器带载调压分接头按钮有效。点击该按钮输入变压器带载调压分接头信息(最大值、最小值、步长和控制目标及允许偏差范围)。如果在变压器编辑器分接头页中 LTC 前的“□”打上“√”,ETAP 潮流分析会自动确定 LTC 数据(位置);如果在潮流分析案例编辑器中“更新变压器带载调压分接头”前的“□”打上“√”,ETAP 潮流分析会把 LTC 数据(位置)更新到这里。