

21世纪高等院校优秀教材

电力电子技术的 MATLAB 实践

黄忠霖 黄京 编著

MATLAB
国防工业出版社
National Defense Industry Press

TN
542
2:

21 世纪高等院校优秀教材

电力电子技术的 MATLAB 实践

黄忠霖 黄 京 编著



中国出版集团

(北京市西城区德胜门内大街 2 号 100088)

国防工业出版社

北京

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16 32 页 1.5 印张 32000 字

(定价: 28.00 元)

· 北京 ·

内 容 简 介

由于电力电子技术的各种装置在国民经济各行各业中的应用非常普遍,所以在高等学校中,“电力电子技术”是自动控制类各专业、控制工程类各专业学生必修的课程。

作者本着把最优秀的计算仿真软件 MATLAB 与电力电子技术两者结合起来的宗旨专门撰写了《电力电子技术的 MATLAB 实践》。

除电力电子技术 MATLAB 实践概述外,本书包括两大部分。

上篇 MATLAB 实践基础部分包括:MATLAB 7.1 系统概述、MATLAB 数值运算、MATLAB 符号运算、MATLAB 程序设计、MATLAB 7.1 常用图形命令与符号函数图形命令五章。

下篇电力电子技术的 MATLAB 实践部分包括:MATLAB 7.1 的仿真集成环境 Simulink 6.3、常用电气系统实体图形化仿真模型、交流—直流变换、直流—交流变换、直流—直流变换、交流—交流变换、直流调速系统的仿真、交流调速系统的仿真八章。

书后的附录是作者重新收集并整理的 MATLAB 通用函数(非控制工具箱函数),以方便读者查阅、使用。

本书既可作为电力电子技术各专业师生选用的教材,也可作为自动控制类各专业(工业自动化、电气自动化、机电一体化、过程控制、化工自动化、电站自动化、纺织自动化、高层建筑自动化、印刷造纸自动化)学生学习“电力电子技术”或“半导体变流技术”或“晶闸管变流技术”课程并完成作业、上机操作实践、完成课程设计与毕业设计的仿真教材,同时还可作为自动控制领域工程技术人员学习 MATLAB 的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术的 MATLAB 实践/黄忠霖,黄京编著. —
北京:国防工业出版社,2009.1
21 世纪高等院校优秀教材
ISBN 978-7-118-06006-5

I. 电... II. ①黄...②黄... III. 电子系统—计算机
辅助计算—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 161695 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22¼ 字数 563 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前言

电力电子技术的各种装置在国民经济各行各业中广泛应用。从电能转换的观点,电力电子的各种装置涵盖交流—直流变换、直流—交流变换、直流—直流变换、交流—交流变换。电力电子应用技术的学科门类,包括各种形式电源技术应用、电力拖动的控制技术应用、电网电能质量提高技术与大功率电能输送技术的应用等等。

MATLAB 程序设计语言是美国 MathWorks 公司推出的高性能数值计算软件,这种适合多学科,功能特强、特全的大型软件,是学习线性代数、自动控制技术、数理统计、数字信号分析与处理、动态系统仿真等各种课程的基本工具。

电力电子技术中有关电能的变换与控制过程,内容大多涉及电力电子技术各种装置的分析与大量的计算、电能变换的波形分析、测量与绘制等,这些工作特别适合 MATLAB 的使用。MATLAB 运算功能强大,计算精准又快捷;实体图形化模型的仿真简单、方便、能节省设计与降低成本;MATLAB 绘制的图形尤其准确、清晰、精美;MATLAB 界面友好,使用特别方便灵活。

随着 MATLAB 版本的升级,出现了最新且运行效果最好的版本 MATLAB 7.1,本书便是电力电子技术与 MATLAB 7.1 的结合。

本书并不完全讲述电力电子技术的内容,而是一本高等学校电气控制类各专业知识学习“电力电子技术”或“晶闸管变流技术”或“半导体变流技术”课程、进行课程实验与课程设计或毕业设计的最好工具书。

本书包括 MATLAB 实践基础(共 5 章)与电力电子技术的 MATLAB 实践(共 8 章)两部分。作者力求突出本书特色,具体如下。

(1) 与时俱进,全力推介功能最新最全与运行效果最好的版本 MATLAB 7.1 系统与仿真集成环境 Simulink 6.3。

(2) 特别精准介绍两种 MATLAB 的仿真模型:数学模型与实(际物)体图形化仿真模型。本书主要介绍的电气系统模型就是实体图形化仿真模型,有文献叫电力系统模型。笔者认为:这有与强电领域的电力系统相混淆之弊;就“SimPowerSystems”里的内容而言,强电领域里电力系统部分的各种仿真模型仅仅只占很小的比例,大部分仿真模型对应着国内通常说的电气工程系统的各种装置,故在此译成电气系统模型。本书特别适合 MATLAB 的电气系统模型的使用。实体图形化模型库中的模块就相当于实验室或实际工程里的图形化的实际物体或图形符号,如电阻、电容、电源、电机、触发器与晶闸管整流装置、电压表、电流表等,将这些实际物体的图形符号连接就能成为一个电路、一个装置或是一个系统。电气系统模型虽不是真实物体,而只是实际物体的图形化模型,但它具有实际物体的特质属性与特征。这种实体图形化模型的仿真更具有实用价值与低成本,非常简单方便。

还要指出,本书介绍的仿真模型,其参数值设置是经作者或由计算或是仿真寻优、逐步逼

近而得的,若读者有兴趣还可对参数进一步优化。

本书的示例模型都能够在 MATLAB 环境里可靠运行,在个别举例中也应用了数学模型的仿真。

(3) 文字叙述清楚,概念阐述准确,深入浅出,通俗易懂,方便自学。

(4) 尽力为读者提供力所能及的服务。MATLAB 的函数命令内容丰富,种类繁多,功能各异。书后的附录是作者重新搜集并整理的 MATLAB 通用函数(非控制工具箱函数),以方便读者查阅、使用。

(5) 本书示例模型能在 MATLAB 7.1 版系统里可靠运行,希望这些示例能在“电力电子技术”课程里对需要完成作业、进行课程实验与课程设计与毕业设计的读者提供些帮助。

(6) 作者根据十多年来接触、学习与研究 MATLAB 的经历、体会与经验,给出了使用 MATLAB 系统经常出现的问题及其处理方法、运算某些程序应该注意的问题。对于较复杂上机操作的运算题,特别给出了详细的计算步骤与操作过程,尽力方便读者。

在本书编写过程中,得到了刘福、吴江陵、许德阳、关大海、黄少铭、盛海平、陈培敦、马男华、姜迎春、李德阳、彭达成、戴同龄、李德瑞、周年庆、吴有方、王国君、孙重任、魏家常、申立方、杨本山、田园亮、王冠先、夏浩先等同志的支持与帮助,在此表示衷心感谢。在编写本书过程中,还参阅与借鉴了部分兄弟院校的教材,对原作者也一并致谢。

由于时间仓促,加上作者学识水平有限,书中难免有错误与疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

为方便读者,欲获取本书作者开发的 MATLAB 函数、解题模型,可通过以下 E-mail 地址与作者联系:

E-mail: zlhuang41@sina.com

作者

目 录

第 1 章	电力电子技术 MATLAB 实践概述	1
1.1	电力电子器件	1
1.1.1	电力电子器件的可控性分类	1
1.1.2	电力电子器件的工作方式分类	1
1.1.3	电力电子器件的可控驱动信号的性质分类	2
1.2	电力电子变流技术及应用	2
1.2.1	换流概念与换流方式	2
1.2.2	电能转换的基本类型	2
1.2.3	电力电子技术应用	3
1.3	电力电子技术的 MATLAB 实践	4
1.3.1	先进的 MATLAB 系统	4
1.3.2	电力电子技术 MATLAB 实践的特点	6
上篇 MATLAB 实践基础		
第 2 章	MATLAB 7.1 系统概述	7
2.1	MATLAB 7.1 安装与启动	7
2.1.1	MATLAB 7.1 的安装	7
2.1.2	Notebook 的安装	11
2.1.3	MATLAB 7.1 的启动	11
2.1.4	Notebook 的启动	12
2.2	MATLAB 7.1 的系统界面	13
2.2.1	MATLAB 7.1 系统的四个小窗口	14
2.2.2	MATLAB 7.1 的命令窗口	14
2.2.3	MATLAB 7.1 菜单项命令	15
2.2.4	MATLAB 7.1 工具栏按钮	22
2.2.5	Start 开始按钮	23
2.3	MATLAB 7.1 的内容及其查找	23
2.3.1	MATLAB 7.1 的内容	23
2.3.2	MATLAB 7.1 内容的查找	26
2.3.3	MATLAB 7.1 的模糊查询	28
2.3.4	MATLAB 7.1 的 work 子目录	29
2.4	MATLAB 的文字处理工具 Notebook	29
2.4.1	Notebook 菜单命令简介	29

2.4.2	Notebook 的使用	30
2.4.3	Notebook 使用的几个问题	31
第 3 章	MATLAB 数值运算	32
3.1	MATLAB 的数值运算基础	32
3.1.1	常量	32
3.1.2	变量	33
3.1.3	MATLAB 运算符	33
3.2	MATLAB 的数组、矩阵运算	36
3.2.1	数组、矩阵的概念	36
3.2.2	数组或矩阵元素的标识	37
3.2.3	数组与矩阵的输入	39
3.2.4	数组、矩阵的算术运算	41
3.2.5	向量及其运算	48
3.2.6	矩阵的特有运算	51
3.2.7	数组的关系运算	60
3.2.8	数组的逻辑运算	60
3.2.9	特殊字符数组——字符串	62
3.3	MATLAB 的数组函数与矩阵函数	62
3.3.1	数组函数	62
3.3.2	矩阵函数	64
3.4	多项式及其运算	67
3.4.1	多项式运算函数	67
3.4.2	多项式运算举例	67
3.5	MATLAB 的数学表达式及其书写	70
3.5.1	MATLAB 的数学表达式	70
3.5.2	MATLAB 数学表达式的书写	71
第 4 章	MATLAB 符号运算	72
4.1	MATLAB 符号运算概述	72
4.1.1	MATLAB 符号运算入门	72
4.1.2	MATLAB 符号运算的几个基本概念	73
4.2	MATLAB 符号对象的基本运算与关系运算	75
4.3	MATLAB 符号运算的基本函数	76
4.3.1	符号变量代换及其函数 subs()	76
4.3.2	符号对象转换为数值对象的函数 double()、digits()、vpa()、numeric(N)	77
4.3.3	MATLAB 符号表达式的化简	77
4.4	MATLAB 符号微积分运算	79
4.4.1	MATLAB 符号极限运算	79
4.4.2	MATLAB 的符号函数微分运算	80
4.4.3	MATLAB 符号函数积分运算	81
4.4.4	符号求和函数与 Taylor(泰勒)级数展开函数	82

4.5	MATLAB 符号矩阵的几种特殊运算	84
4.5.1	矩阵的微分与积分	84
4.5.2	Jacobian 矩阵	85
4.5.3	矩阵的 Jordan 标准形	86
4.6	MATLAB 符号方程求解	87
4.6.1	MATLAB 符号代数方程求解	87
4.6.2	MATLAB 符号微分方程求解	88
4.7	复变函数计算的 MATLAB 实现	90
4.7.1	复数的概念	91
4.7.2	MATLAB 关于复变量的函数命令	91
4.7.3	复数的生成与创建复矩阵	92
4.7.4	复数的几何表示	93
4.7.5	复数代数运算的 MATLAB 实现	95
第 5 章	MATLAB 程序设计	98
5.1	M 文件、MATLAB 函数与 MATLAB 程序	98
5.1.1	M 文件	98
5.1.2	MATLAB 函数	98
5.1.3	MATLAB 命令文件或程序	101
5.2	MATLAB 程序设计基础	102
5.2.1	MATLAB 程序设计基本规则	103
5.2.2	表达式、表达式语句与赋值语句	103
5.2.3	程序流程控制语句	104
5.2.4	程序流程控制指令	110
5.3	MATLAB 程序的交互式、调试与警示指令	111
5.3.1	MATLAB 程序的交互式指令	111
5.3.2	MATLAB 程序的调试指令	111
5.3.3	MATLAB 程序的常用警示指令	113
5.4	MATLAB 程序设计再举例	113
第 6 章	MATLAB 常用图形命令与符号函数图形命令	116
6.1	MATLAB 的常用图形命令	116
6.1.1	绘图函数 plot()	116
6.1.2	绘图坐标系的调整	117
6.1.3	图形标注	118
6.1.4	多次重叠绘制图形	120
6.1.5	图形窗口的分割	121
6.2	MATLAB 的特殊坐标绘图函数	121
6.2.1	对数坐标曲线	122
6.2.2	极坐标曲线	123
6.2.3	双 y 轴坐标曲线	124
6.2.4	复数的图形曲线	125

6.3	MATLAB 离散数据与步进图形的绘图函数	126
6.3.1	MATLAB 绘制离散数据图形的函数命令 stem()	126
6.3.2	MATLAB 绘制步进图形的函数命令 stairs()	127
6.4	MATLAB 符号函数的图形命令	128
6.4.1	符号函数的简捷绘图函数命令 ezplot()	128
6.4.2	符号函数的绘图函数指令 fplot()	131
6.4.3	符号函数的极坐标绘图函数命令 ezpolar()	132

下篇 电力电子技术的 MATLAB 实践

第 7 章	MATLAB 7.1 的仿真集成环境 Simulink 6.3 与 SimPowerSystems 4.1.1	133
7.1	Simulink 仿真特色与其模型窗口	133
7.1.1	Simulink 仿真特色	133
7.1.2	进入 MATLAB 7.1 的 Simulink 6.3	134
7.1.3	Simulink 6.3 的模型窗口概述	134
7.2	Simulink 6.3 的界面与组成	139
7.2.1	Simulink 6.3 功能模块组的打开与关闭	139
7.2.2	Simulink 6.3 功能模块的分类及其用途	140
7.2.3	有关 Simulink 6.3 的几个问题	152
7.3	用 Simulink 建立系统模型	153
7.3.1	打开模型窗口的方法	153
7.3.2	模块的查找与选择	154
7.3.3	模块的复制、移动与删除	154
7.3.4	模块的连接	155
7.3.5	模块标题名称的修改	156
7.3.6	系统结构图模型标题名称的标注与修改	157
7.3.7	创建模型的取消与复原操作	157
7.3.8	模型文件的保存与打开	157
7.3.9	模型框图的打印	158
7.3.10	Simulink 建模注意事项	158
7.4	模块内部参数的设置或修改	158
7.4.1	常用 15 个模块内部参数的设置或修改	158
7.4.2	用 Simulink 建立系统模型举例	165
7.5	观察 Simulink 的仿真结果	167
7.5.1	使用示波器模块观察仿真输出	167
7.5.2	使用 To Workspace 模块将仿真输出信息返回到 MATLAB 命令窗口中	169
7.5.3	使用 Out1 模块将仿真输出信息返回到 MATLAB 命令窗口中	171
7.6	Simulink 的分析工具	172
7.6.1	模型线性化概述	172
7.6.2	连续系统的线性化模型	172
7.6.3	离散系统的线性化模型	173

7.6.4	Simulink 平衡点的求取	173
7.6.5	Simulink 里由状态方程转换成 LTI(线性时不变系统)对象	174
7.6.6	在 Simulink 里绘制波德(Bode)图与时间响应图	174
7.7	自定义子系统与子系统的封装	176
7.7.1	自定义子系统	176
7.7.2	子系统的封装	179
7.8	电气系统实体图形化模型库简介	182
7.8.1	电源模块组	182
7.8.2	电器元件模块组	183
7.8.3	电力电子元件模块组	184
7.8.4	电机模块组	187
7.8.5	电气测量仪表模块组	188
7.8.6	应用程序模块组	191
7.8.7	其他电气模块组	191
第 8 章	常用电气系统实体图形化仿真模型	192
8.1	基本电路元件的仿真模型	192
8.1.1	电源	192
8.1.2	RLC 元件	194
8.2	典型电机与变压器的仿真模型	195
8.2.1	电机	195
8.2.2	变压器	199
8.3	基本电力电子器件的仿真模型	201
8.3.1	二极管	202
8.3.2	晶闸管	203
8.3.3	可关断晶闸管 GTO	205
8.3.4	电力场效应管 MOSFET	206
8.3.5	绝缘栅双极型晶体管 IGBT	208
8.3.6	理想开关	209
8.3.7	多功能桥式整流电路	210
8.4	电力电子变流器典型驱动装置的仿真模型	211
8.4.1	同步 6 脉冲触发器	211
8.4.2	同步 12 脉冲触发器	213
8.4.3	脉宽调制 PWM 脉冲发生器	213
8.4.4	脉冲信号发生器	216
8.5	典型测量元件的仿真模型	217
8.5.1	电压测量	217
8.5.2	电流测量	217
8.5.3	万用表	218
8.5.4	三相电压电流测量	219
第 9 章	交流一直流变换	221

871	9.1 单相可控整流电路的 MATLAB 仿真	221
471	9.1.1 单相半波可控整流电路(电阻性负载)的 MATLAB 仿真	221
471	9.1.2 单相半波可控整流电路(阻感性负载)的 MATLAB 仿真	225
471	9.1.3 单相桥式半控整流电路(电阻性负载)的 MATLAB 仿真	226
471	9.1.4 单相全波可控整流电路(电阻性负载)的 MATLAB 仿真	228
471	9.1.5 单相桥式全控整流电路(阻感性负载与反电势负载)的 MATLAB 仿真	229
581	9.2 三相可控整流电路的 MATLAB 仿真	231
581	9.2.1 三相半波可控整流电路(电阻性负载)的 MATLAB 仿真	232
581	9.2.2 三相桥式半控整流电路(电阻性负载)的 MATLAB 仿真	235
481	9.2.3 三相桥式全控整流电路的 MATLAB 仿真	239
781	9.2.4 双三相桥十二相整流电路(电阻性负载)的 MATLAB 仿真	243
	第 10 章 直流—交流变换	246
101	10.1 单相桥式全控整流及有源逆变电路的 MATLAB 仿真	246
101	10.1.1 单相桥式全控整流及逆变仿真模型	246
501	10.1.2 仿真模型使用模块的参数设置	247
501	10.1.3 模型仿真及仿真结果	248
501	10.2 三相半波整流及有源逆变电路的 MATLAB 仿真	249
401	10.2.1 三相半波整流及有源逆变电路(阻感性负载)仿真模型	249
501	10.2.2 仿真模型使用模块的参数设置	250
501	10.2.3 模型仿真及仿真结果	250
901	10.3 三相桥式整流及有源逆变电路的 MATLAB 仿真	251
105	10.3.1 三相桥式整流及逆变电路仿真模型	251
505	10.3.2 仿真模型使用模块的参数设置	252
505	10.3.3 模型仿真及仿真结果	252
205	10.4 正弦波脉宽调制逆变器的 MATLAB 仿真	252
805	10.4.1 三相电压源 SPWM 逆变器仿真模型	252
805	10.4.2 仿真模型使用模块的参数设置	253
905	10.4.3 模型仿真及仿真结果	254
015	10.5 滞环控制三相电流跟踪型逆变器的 MATLAB 仿真	256
115	10.5.1 滞环控制三相电流跟踪型逆变器仿真模型	256
115	10.5.2 仿真模型使用模块的参数设置	257
515	10.5.3 模型仿真及仿真结果	258
	第 11 章 直流—直流变换	260
015	11.1 降压式变换器的 MATLAB 仿真	260
715	11.2 升压式变换器的 MATLAB 仿真	263
715	11.3 升/降压式变换器的 MATLAB 仿真	265
715	11.4 Cuk 直流斩波器的 MATLAB 仿真	267
	第 12 章 交流—交流变换	270
915	12.1 单相交流调压电路的 MATLAB 仿真	270
155	12.2 三相交流调压电路的 MATLAB 仿真	274

12.3	交流整流—逆变电路的 MATLAB 仿真	278
12.3.1	单相整流—逆变电路的 MATLAB 仿真	278
12.3.2	三相整流—逆变电路的 MATLAB 仿真	281
第 13 章	直流调速系统的仿真	284
13.1	直流电动机启动的仿真	284
13.1.1	直流电动机直接启动仿真	284
13.1.2	直流电动机分级启动仿真	286
13.2	直流电动机基本调速方法的仿真	288
13.2.1	直流电动机调压调速的仿真	288
13.2.2	直流电机调节励磁电流调速	289
13.2.3	开环直流调速系统仿真	290
13.3	直流脉宽 PWM-M 调速系统的仿真	292
13.3.1	转速开环直流脉宽 PWM-M 调速系统的仿真	293
13.3.2	转速闭环直流脉宽 PWM-M 调速系统的仿真	295
13.4	单闭环直流 V-M 调速系统的仿真	296
13.4.1	转速负反馈单闭环有静差 V-M 直流调速系统静特性的仿真	296
13.4.2	转速负反馈单闭环直流调速系统仿真	299
13.5	转速、电流双闭环直流 V-M 调速系统的仿真	303
13.5.1	系统仿真模型	303
13.5.2	仿真模块参数设置	304
13.5.3	模型仿真及仿真结果	304
第 14 章	交流调速系统的仿真	305
14.1	交流电机调压调速系统的仿真	305
14.1.1	交流电机开环调压调速系统的仿真	305
14.1.2	交流电机速度反馈调压调速系统的仿真	307
14.2	交流电机串级调速系统的仿真	309
14.2.1	交流电机串级调速系统的仿真模型及其简介	309
14.2.2	仿真模型的模块提取的路径及其参数设置	310
14.2.3	模型仿真及仿真结果	312
附录	MATLAB 基本函数	313
参考文献		343

第1章 电力电子技术 MATLAB 实践概述

电力电子技术是研究各种电力电子器件及其所构成的各种变流电路与装置，并运用这些装置实现对电能的变换与控制的技术。由于装置的功率放大倍数特别大、动态响应快、功耗低、效率高、节能效果显著，还有装置的体积小、质量小、无噪声、无火花磨损、维护方便、可靠性高等诸多优点，因此在国民经济中，电力电子技术应用非常广泛。

本章简要复习电力电子器件、电力电子变流技术、电力电子技术应用与概述 MATLAB 实践的主要特点。

1.1 电力电子器件

电力电子器件是一系列固态高电压、大电流的电子器件，由于器件承受电压高，流经与通断的电流大，因此被控制对象的设备功率很大。通常情况下，电力电子器件的控制所需功率却不是很大，这就是所谓的弱电控制强电。电力电子器件的工作情况多种多样，五花八门，最主要的是器件的可控性、工作方式与驱动信号性质。

1.1.1 电力电子器件的可控性分类

按电力电子器件的可控性可分为三类：不控型器件、半控型器件与全控型器件。

不控型器件常为二端器件，即二极管。实质上它是一个 PN 结，阴阳极之间施加正向电压时，二极管导通，施加反向电压时，二极管关断。显然，流过二极管的电流是单方向的，其导通与关断不能按需要进行控制，故而称为不可控器件。各类二极管都是不控型器件。

半控型器件常为三端器件，多是多层 PN 结的结构，它有阳极、阴极与控制门极，电流只能从阳极流向阴极，即有单向导电性。当阳极与阴极间施加正向电压时，还必须在门极与阴极间输入正向控制电压，器件才能导通。器件一旦导通，就不能再通过门极来控制关断，只能通过改变阳极与阴极间的电压极性或强制使阳极电流减小至 0，才能使其关断，故而称为半控型器件。普通晶闸管 Th 及其派生的双向晶闸管、逆导晶闸管等都是半控型器件。

全控型器件也是三端器件，控制门极不仅可控制其导通，而且也能控制其关断，故而称为全控器件。大功率晶体管 GTR、门极可关断晶闸管 GTO、绝缘栅双极型晶体管 IGBT、电力场效应管 MOSFET 等都是全控型器件。

1.1.2 电力电子器件的工作方式分类

根据电力电子变流技术的理论，电力电子器件的工作方式或工作状态可分为两种：开关工作方式与非开关工作方式。顾名思义，开关工作方式指器件不是全导通就是全关断，即器件就是一个可控开关。开关工作方式又分两种：频率控制工作方式与脉宽调制工作方式。

频率控制工作方式是用控制电压信号的幅值变化来改变器件开关信号的频率，以实现器件开关频率的控制。

脉宽调制工作方式下,器件以远高于输入、输出电压工作频率的开关频率运行,利用控制电压即调制电压的幅值控制一个开关周期中的器件导通占空比,来实现电能的变换与控制。直流—交流(DC/AC)变换(第10章)中的正弦波脉宽调制变换器 SPWM 与直流—直流(DC/DC)变换(第11章)中的脉宽调制变换器 PWM 就采用这种工作方式。

根据电力电子变流技术的理论,通常电力电子器件的导通状态既不是全导通,也不是全关断,这种非开关工作方式下,控制角 α 不全等于0而是变化的,导通角 θ 也不全等于0也是变化的,这就是触发脉冲移相工作方式或简称相控方式。所谓触发脉冲移相工作方式,就是器件导通时刻的相位,即控制角 α 是可调(可移相)的,受控于一个控制电压信号幅值的变化。工程中被广泛采用的普通晶闸管可控整流与交流调压电路多采用这种工作方式。

1.1.3 电力电子器件的可控驱动信号的性质分类

按电力电子器件可控驱动信号的性质可分为电流型与电压型。电流型器件必须有足够的驱动电流才能使器件导通,一般需要较大功率的驱动电路。这类器件有普通晶闸管 Th、大功率晶体管 GTR、可关断晶闸管 GTO 等。电压型器件的导通是电场作用型的,只需足够的电压与极小的驱动电流即可,器件仅需很小的驱动功率,这类器件有 IGBT、MOSFET 等。

1.2 电力电子变流技术及应用

电力电子变流技术是以电力电子器件实现的电能变换,包括电压、电流与频率的变换技术。变流也称换流,变流过程也称换流过程。

1.2.1 换流概念与换流方式

变流技术首要分析的是主电路与控制电路的结构形式,其次要研究变流电路的换流过程。根据电力电子技术的原理,变流电路工作时,电子器件轮流导通向负载传递电能。流向负载的电能从一个或一组器件向另一个或一组器件转移的过程称为换流或换相,变流电路常有三种换流方式。

(1) 电源换流。通过改变电源电压极性对导通元件施加反向电压使其关断。以不控或半控器件组成的由交流电源供电的整流电路多为这种换流方式。

(2) 负载换流。由负载电压或电流极性的改变对导通元件施加反向电压使其关断。由直流供电、负载电压或电流振荡的直流—交流变换电路多为这种换流方式。

(3) 强迫换流。由外部电路对导通元件强行施加反向电压或从导通元件控制极施加关断信号迫使其关断。直流—直流变换电路多为这种换流方式。

1.2.2 电能转换的基本类型

已经说明,电能变换主要指电压、电流与频率的变换。所以电能转换的基本类型有四种,即 AC/DC 变换、DC/AC 变换、DC/DC 变换、AC/AC 变换。

(1) 将交流电变换成直流电的变换叫交流—直流变换。

这就是最传统的整流变换,在国民经济各行各业中广泛应用。无论整流装置功率大小,其控制都简单而方便,运行可靠。惟独整流装置的高次谐波,成为电网的电力公害。

(2) 将直流电变换为交流电的变换叫直流—交流变换。

这是整流变换的逆变换,简称逆变。根据电力电子技术的原理,按负载性质的不同,逆

变分为有源逆变与无源逆变。按电源性质的不同,分为电压源逆变与电流源逆变。按控制方式的不同,分为方波逆变与 PWM 逆变。逆变装置广泛用于机车牵引、交流电机调速、各种电子装置的不间断电源 UPS、感应加热等领域。

(3) 将一直流电压变换为可调或固定的直流电压的变换叫直流—直流变换。这种变换装置多使用具有自关断能力的全控型器件,器件工作在开关状态,即将直流电压断续地加到负载上,通过改变电压加到负载上的时间与停歇的时间来改变负载上电压的平均值。装置以体积小、质量小、效率高等优点被广泛用于干线铁道、工矿与城市地铁的电力机车牵引调速、电瓶搬运车、铲车、通信系统电源、计算机系统电源、大型变配电站或变流站控制系统的直流操作电源、各类仪器仪表、金属焊接等。

(4) 把频率、电压固定或变化的交流电变换为频率、电压可调或固定的交流电叫交流—交流变换。

使用最广泛的是交流电力控制电路与晶闸管交—交变频器,前者包括交流开关、交流调功器与交流调压器等。

以上电能转换的四种基本类型装置的 MATLAB 仿真是本书介绍的主要内容。

1.2.3 电力电子技术应用

以上在介绍电能转换的四种基本类型时,已经联系到了各个类型的某些应用。现在再综合目前电力电子技术的应用领域归纳如下。

1. 多种形式电源

国民经济各行各业需要多种多样的电压等级不同规格的直流与交流电源。

不间断电源 UPS 被广泛应用于通信系统、计算机系统、不允许停电的重点实验室、各种微电子系统及医院、宾馆等公共场所。

大型变配电站或变流站控制系统的二次回路操作电源是直流的。除用蓄电池外,大多采用硅整流电容储能式或复式整流的直流电源。

计算机系统或通信系统电源的一次电源是典型 AC/DC 变换的应用,即将工业交流电整流为 48V 的直流电;其二次电源则是 DC/DC 变换(第 11 章)的应用。这里的 DC/DC 变换大量采用 P-MOSFET 器件,其开关工作频率大多在几十千赫或 100kHz,其电压等级与功率规格多种多样。

2. 电力拖动控制

电动机调速是电力电子技术在电力拖动控制中的重要应用,它有直流电机拖动与交流电机拖动两个方面。

直流电机具有良好的启动、制动性能,宜于在宽范围内平滑无级调速,在轧钢机、铁路机车、金属切削机床、高层电梯、矿井卷扬机、挖掘机、造纸机、纺织印染、各类起重机、船舶推进系统等需要高性能可控电力拖动领域中得到了广泛的应用。

交流电机大量用于风机、水泵、空调等负载,这类负载用电量占我国工业用电总量的 50% 以上。若能对交流电机采用电力电子的变频调速,其节能效益将非常惊人,其应用前景会十分广阔。

直流与交流电机调速的 MATLAB 仿真是本书介绍的又一主要内容。

3. 电网电能质量提高技术

电力电子器件及其装置的广泛应用,使得工业电网的电压波形畸变无法避免。电网的谐波对于运行的电气设备危害极大,是当前电力系统中影响电能质量的一大“公害”。电子有源

滤波器是电力电子技术在抑制电网谐波方面的一个应用。

由于工业电网上电感性负载的广泛存在,使得电网的功率因数小于1。这不仅使国家的发电设备资源不能得到充分利用,而且还会浪费大量电能。因此,国家在《供电营业规则》中规定:对于100kV·A及以上的高压电力用户,功率因数为0.9以上,其他电力用户,功率因数为0.85以上。用电力电子器件构成的各种各样的提高功率因数的装置是提高电网电能质量的又一个应用。

4. 大功率电能输送

高压直流输电是目前大功率电能输送的先进技术,也是电力电子技术的又一应用。其过程是在输电线路的起始端将工频交流电整流为直流电,在受能端再将直流电逆变回工频交流。这种方法从根本上解决了输电的稳定性问题,减少了线路的无功损耗,实现了大功率电能的先进与高效的远距离输送。目前,高压直流输电在我国西电东输的线路中得到了成功的应用。

1.3 电力电子技术的 MATLAB 实践

1.3.1 先进的 MATLAB 系统

MATLAB 程序设计语言是美国 MathWorks 公司在 20 世纪 80 年代中期推出的高性能数值计算软件。该公司经过二十几年的开发、扩充、不断完善与更新换代, MATLAB 已经发展成适合多学科且功能特别强、特别全的大型软件,2005 年 8 月该公司已推出 MATLAB7.1 版。

在国内外, MATLAB 已经经受了多年考验,成为线性代数、自动控制理论、数理统计、数字信号分析与处理、动态系统仿真等各种课程的基本数学工具。

MATLAB 有以下主要特点。

(1) MATLAB 直观、简单的电气系统 SimPowerSystems(实体图形化仿真模型)。在 MATLAB 的 Simulink 里,提供了一个实体图形化仿真模型库,与数学模型库相对应。有文献把“SimPowerSystems”译成电力系统,笔者认为这与强电领域的电力系统相混淆之弊,故在此译成电气系统。实体图形化模型库中的模块就是实际工程里实物的图形符号,例如,代表电阻、电容、电源、电机、触发器与晶闸管整流装置、电压表、电流表等实物的是特有图形符号,将这些实际物体的图形符号连接就能成为一个电路、一个装置或是一个系统,它不是真实的物体,而是实际物体的图形化模型。这种实体图形化模型的仿真(有文献称为按系统原理图进行的仿真)更具有实用价值与低成本等特点。

(2) 功能强大,适用范围广。MATLAB 可用于线性代数里的向量、数组、矩阵运算,复数运算,高次方程求根,插值与数值微商运算,数值积分运算,常微分方程的数值积分运算,数值逼近,最优化方法等,即差不多所有科学研究与工程技术应用需要的各方面的计算,均可用 MATLAB 来解决。

现有的资料表明,这些运算在电气工程、自动控制、通信工程、信号分析、图像信号处理、计算机技术、汽车制造、建筑业、航空航天以及半导体制造业等各行各业都有极广泛的应用。可以说,无论从事工程技术方面的哪个学科,在 MATLAB 里都能有相应合适的功能解决该学科的计算问题。

(3) 编程效率高。MATLAB 语言提供了丰富的库函数(称为 M 文件),既有常用的基本库函数,又有种类齐全、功能丰富多样的专用工具箱 Toolbox 函数。函数即是预先编制好的子程序。在编程序时,这些库函数都可以被直接调用。这无疑会大大提高编程效率。

MATLAB 的基本数据编程单元是不需要指定维数的复数矩阵,所以在 MATLAB 环境下,数组(向量或矩阵)的操作如同数的操作一样简单方便,不必像其他 Basic、Fortran 和 C 等高级语言,要事先定义数组,然后才能进行有关操作。

在科学与工程应用的数值计算领域里,有文献指明,使用 MATLAB 语言的程序设计比使用 Basic、Fortran 和 C 等语言进行程序设计的编程效率要高几倍。

(4) 界面友好,用户使用方便。首先, MATLAB 具有友好的用户界面与易学易用的帮助系统。用户在命令窗里通过 help 命令可以查询某个函数的功能及用法,命令的格式极为简单(格式为 help+命令或函数)。这样,对初学者也不会望而生畏。

其次, MATLAB 程序设计语言把编辑、编译、连接、执行、调试等多个步骤融为一体。无论直接输入语句(命令),包括调用 M 文件的语句,还是将 MATLAB 源程序编辑为 M 文件,都立即完成编译、连接和运行的全过程。如果运行 M 文件有错,计算机屏幕会给出详细的出错红色信息提示,让用户修改,直到正确为止。

再者, MATLAB 语言可设置中断点,存储多个中间结果。除此以外,它还可进行跟踪调试。MATLAB 语言灵活方便,其调试手段丰富,调试速度快。

还有,在 MATLAB 里,既可执行程序(即 M 文件),又可通过人机对话,调用不同的库函数即子程序,方便快速地达到用户自己的目的,以实现 MATLAB 的交互功能。

最后, MATLAB 是演算纸式的科学与工程计算语言。使用 MATLAB 编程运算与人进行科学计算的思路和表达方式完全一样,用 MATLAB 编写程序,犹如在一张演算纸上排列书写公式,运算求解问题,十分方便。

(5) 扩充能力强。MATLAB 系统不仅为用户提供了可直接调用的丰富的库函数,而且在 MATLAB 语言环境下,用户还可以根据需要,自行建立或扩充完成指定功能的 M 文件(即新的库函数),与 MATLAB 提供的系统里的库函数一样保存、使用,以提高 MATLAB 使用效率与丰富、扩充它的功能。

另外,为了充分利用 Basic、Fortran 和 C 等语言的资源,包括用户已经编写好的 Basic、Fortran 和 C 语言程序,通过建立 Mex 文件的形式,进行混合编程,能够方便地调用 Basic、Fortran 和 C 语言的子程序,以进一步丰富及扩充 MATLAB 程序语言的功能。

(6) 语句简单内涵丰富。MATLAB 最基本的语句结构是赋值语句,语句的一般形式为

变量名列表=表达式

式中:等号左边的变量名列表为 MATLAB 的语句返回值;等号右边是表达式的定义,它可以是 MATLAB 允许的矩阵运算,也可以是 MATLAB 的函数调用。

MATLAB 程序设计语言最重要的成分是函数。函数调用的一般形式为

[a,b,c,...] = fun (d,e,f,...)

即一个函数由函数名,输入变量 $d, e, f, \dots$ 与输出变量 $a, b, c, \dots$ 组成,同一函数名,不同数目的输入变量及不同数目的输出变量,代表着不同的含义。这不仅使 MATLAB 的库函数功能更加丰富,而且大大减少了需要的磁盘空间,使得 MATLAB 编写的 M 文件简单、精炼而高效。

(7) 强大方便的图形功能。MATLAB 提供了许多“高级”图形函数,可绘制出多姿多彩的图形。例如,绘制二维、三维曲线并对平面或空间多边形填充;绘制三维曲面并对其进行复杂操作。

MATLAB 还开发了一些面向图形对象的“低级”图形函数,可以访问硬件系统建立各种“低级”图形对象,它们以图形句柄为界面。用户使用图形句柄可以操作图形的局部元素。