

实用电源技术丛书

# 电源的计算机 仿真技术

陆治国 编著



科学出版社

实用电源技术丛书

# 电源的计算机仿真技术

陆治国 编著

科学出版社

2001

---

## 内 容 简 介

电源的计算机仿真技术是高性能电源系统研究和开发的先进手段。本书对电源的仿真方法和计算机仿真软件的基本原理进行了系统介绍,着重阐述了离散时域仿真方法和计算机建立网络方程的基础理论;对电源仿真研究中最常用的软件系统的使用方法、建模方法进行了总结,并介绍了相关的研究成果。这些仿真软件是:MATLAB,Saber,PSpice,SIMPLIS,IsSpice和POWER 4-5-6。

本书可作为高等院校电力电子技术专业高年级学生、研究生的参考书,也可供从事电源系统研究和开发的技术人员参考。同时,本书对电气工程学科从事仿真研究的人员也具有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

电源的计算机仿真技术/陆治国编著.-北京:科学出版社,2001  
(实用电源技术丛书)  
ISBN 7-03-008357-1

I. 电… II. 陆… III. 电源-计算机仿真 IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 84167 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2001 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16  
2001 年 4 月第一次印刷 印张:14 1/2  
印数:1-3 000 字数:320 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

## 序 言

什么是电源？很难用一句话概括。但是，现代人谁能离得开电源？衣食住行离不开电源，文化娱乐、办公学习、科学研究、工农业生产、国防建设、教育、环境保护、医疗卫生、交通运输、照明、通讯、宇宙探索等等，哪一样能少得了电源？只要用电就离不了电源。绝大部分的电是由发电厂生产发送的，称为市电。白炽灯、电炉、交流电动机等只要接通市电就行；计算机、电视机、X光机等虽然也是打开开关就能工作，但是这些机器里面都已经做了电能变换处理，将正弦波的交流市电转换成各自需要的直流电、高压电、脉冲电；在无法提供市电的岛屿、车船上，可以用蓄电池经过电能变换获得跟市电一样的交流电，让计算机、仪器设备等工作起来；进入太空的卫星、飞行器，把太阳能收集起来，再经过电能变换，获得需要的各种电能来维持长期运行。电能是宝贵的资源，需要珍惜和节约。绿色照明的节能荧光灯、高光效的HID灯电子镇流器，是经过功率因数校正和高频化处理的电源装置，既省电又净化了电网；交流电动机经过频率变换即所谓变频调速，实现了电动机科学运转及电能的合理使用。水力发电、火力发电、核电站是电的主要来源；太阳光、风力、沼气、潮汐、生物能、化学能等等在特定环境里也能发电，作为电力的补充，这些补充发电需要经过DC/DC和DC/AC电能变换使其便于储存，并转换成与电网频率一致的正弦波。电网不稳定给用电设备带来许多麻烦，甚至无法正常工作；太阳、风力受四季和天气影响，发出的电更是不稳，很多场合需要稳压供电，这有赖于电能变换加以调整。总括起来，所谓电源乃是利用电能变换技术将市电或电池等一次电能转换成适合各种用电对象的二次电能的系统或装置。

上述电能变换主要体现在变压、调压、整流、滤波、稳定、变换等。而这些基本的电能变换是通过一系列的技术方法实现的，并且这些技术方法分别适用于不同的环境条件和要求。

**变压：**变压器是交流变压最常用的装置，相位控制也能完成交流变压，线性补偿、频率变换、时间分割（脉冲宽度调制，即著名的PWM）等都能实现变压。直流变压最常用的手段就是DC/DC变换，无源和有源分压器是小功率直流变压较简便的方法。

**调压：**在变压的基础上加以步进和连续的设置就成为调压。根据需要可以手动、自动或遥控。

**整流：**整流是最早使交流电转换成直流电的方法。利用单相性的无源器件来实现则最简单，利用有源开关的同步整流器能将整流器的损耗减至极小。

**滤波：**为获得平滑的直流电，可以通过无源或有源的滤波电路来实现。

**稳定：**将变压或调压引入自动负反馈控制，就能使之稳定。若反馈量分别是电压、电流、功率、频率、相位，则响应获得稳压、稳流、恒功率、稳频、稳相的稳定电源。

**变换：**变换的特定含义是由一种状态转变到另一种状态。比如交流-直流之间的转换；正弦波、方波、三角波、梯形波、脉冲波、特种波等波形转换；低频-高频转换；光、热、机械、风、磁、理化等能量与电能之间的转换。

电能变换涉及的技术非常多，常见的有参数稳压、线性反馈稳压、磁放大器技术、数控调压技术、相控技术、变频、PWM、SPWM、软开关PWM、移相谐振、无功补偿、功率因数校正、裂相、电流均分、传感采样、驱动保护、储能、充电、抗干扰、电磁兼容等等。实际需要推动这些技术不断发展和进步，使电源装置能满足负载各种各样的需求。

造就这些电源装置还需要专用的元器件和材料。电能变换用到的器材有功率开关器件、专用的集成电路、软磁材料以及外围元器件等。由于很多电源装置结构相当复杂，为简化设计而出现的集功率开关、变换控制电路、传感保护电路为一体的智能功率集成模块受到欢迎。

厚膜集成的电源模块、积木式的功能模块，灵活机动，既能单独使用，又能相互组合成较大的电源系统。在这里器件和整机的界限已相当模糊。

不同的负载要求不同的电源装置，万能的电源至少今天还未出现。一个特定用途的电源装置，应当具有符合负载要求的性能参数和外特性，这是基本的要求。安全可靠是必须加以保证的。高效率、高功率因数、低噪音是普遍关注的品质。无电网污染、无电磁干扰、省电节能等绿色指标是全球范围的热门话题，并有相关的国际和国家标准规范进行约束。有时特定的使用环境又要求电源具备一些额外的适应性能力，比如高温、高寒、高湿、抗辐射、抗振动、防爆、体积小、重量轻、智能化等。

电源技术发展到今天，已融汇了电子、功率集成、自动控制、材料、传感、计算机、电磁兼容、热工等诸多技术领域的精华，已从多学科交叉的边沿学科成长为独树一帜的功率电子学。

电源技术又是实用性极强的技术，服务于各行各业、各个领域的各式各样的负载，它们的性能特点以及采用的技术方法千差万别，这就造就了电源技术的丰富内涵。

由中国电源学会和科学出版社联合组织出版的《实用电源技术丛书》将展示多彩的电源世界，帮助读者全面了解当今电源的方方面面，并希望读者能从这套丛书中获得启示，在实际工作中找到最佳的电源方案。为此，丛书的选题力求从实际需要出发，内容突出实用性、新颖性和广泛性，写作侧重于原理阐述、实例解剖和经验介绍。我们将尽力让《实用电源技术丛书》成为广大读者的良师益友，但是，电源技术浩如烟海，有限的书目实难尽述。另外，电源的新技术不断涌现，且成长周期相当短，作者的实践有限，谬误之处在所难免，敬请读者指正。

《实用电源技术丛书》编辑委员会

## 《实用电源技术丛书》编辑委员会

顾 问：蔡宣三 丁道宏  
主 任：倪本来  
副主任：张建荣 侯振程  
委 员：马传添 马鹤亭 区键昌 刘凤君 庄蕃田  
李厚福 李朔生 李宗光 陈 坚 严仰光  
张 立 张广明 张志国 张 嵘 张承志  
张占松 张卫平 陆 鸣 段军政 季幼章  
周庭光 赵良炳 赵修科 徐德高 徐会明  
徐泽玮 徐德鸿 徐兰筠 袁维慈 黄济青  
龚绍文 喻 翔 谭 信



# 前 言

电子计算机是 20 世纪最伟大的发明之一。计算机各项性能的飞速提高,给各行各业带来了令人惊奇的变革。在电气工程领域,计算机已经渗透到电路设计、设备制造、系统决策、电能管理以及教学和科研等各个方面。

王兆安教授在重庆大学讲学时说过:“21 世纪是信息的世纪,计算机和高性能的电能变换技术是最大的两个支撑。”从中可见电源技术在信息科学中具有的重要地位。

电源的计算机仿真技术是建立在电路的计算机辅助分析之上的,是电力电子线路仿真的一个十分重要的组成部分。本书对电源的仿真方法和计算机仿真软件的基本原理进行系统介绍,在编写过程中力求做到以下两点:

- 通过学习本书,初步涉及电源的计算机仿真技术的读者能够较为全面地了解电源的仿真方法和工具,以及计算机仿真软件的组成和一些典型的使用技巧。

- 反映该领域研究的一些实用成果,给涉及电源的计算机仿真技术的工程技术人员、大学高年级学生和研究生提供借鉴。

本书共分 9 章。第一章介绍用于电源仿真的几个常用方法。第二章介绍计算机建立网络方程的一般方法,主要介绍生成电路的各种描述矩阵的计算机算法和仿真软件使用得最多的节点分析法。第三章介绍离散时域仿真方法,建立了 DC-DC 变换器的通用仿真模型,并给出了仿真算例。在电源的仿真研究中,MATLAB,PSpice 和 Saber 软件是目前国际上最为流行的三大仿真软件,它们都提供了十分友好的用户图形操作界面,Saber 还建立了与 MATLAB 和 PSpice 的数据接口,使用十分方便。第四、五、六章分别对这三个软件的使用方法、建模和仿真示例进行了介绍。因为电源变换器是一个典型的分段线性系统,第七章介绍分段线性系统仿真软件 SIMPLIS。第八章介绍 IsSpice 及其在电源仿真中的应用,该软件在电源仿真研究中应用相当广泛。第九章介绍专门为开关电源设计与仿真研制的 POWER 4-5-6 软件,该软件的快速仿真速度和规范的设计方法是十分值得学习的。

本书第六章由赵宏伟博士和杨桦博士执笔,其余各章由陆治国编写。刘和平、周林副教授参与了本书结构的规划。在本书编写过程中,国家自然科学基金项目“基于小波分析的有源阻抗变换理论”课题组提供了仿真用的计算机、部分仿真软件和相关的研究成果。美国 Analogy 公司、中国香港(深圳)光映计算机软件公司、上海银利电子有限公司和 MATLab 公司中国香港市场部经理 Danny Chiu 先生为本书的编写提供了许多宝贵的资料。

中国电源学会理事侯振程教授阅读了本书全部书稿,并提出了十分重要的修改意见。对所有关心、支持和参与本书编写的公司和个人,作者在此表示衷心感谢。

对于书中存在的不足和错误,望读者批评指正。

陆治国

2000 年 7 月 8 日于重庆大学电气工程学院

# 目 录

<b>第一章 电源仿真的方法</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.1.1 计算机仿真技术 .....	1
1.1.2 电源仿真方法 .....	1
1.2 小信号分析 .....	2
1.3 离散时域仿真方法 .....	3
1.4 等效电路法 .....	3
1.5 Laplace 变换法 .....	3
1.6 周期时间序列分析 .....	5
<b>第二章 计算机建立网络方程</b> .....	12
2.1 网络分析的基本概念和基本定律.....	12
2.1.1 关联矩阵.....	12
2.1.2 回路矩阵.....	13
2.1.3 割集矩阵.....	13
2.2 用计算机生成拓扑矩阵——关联矩阵 A .....	14
2.3 主树的计算机生成算法.....	15
2.4 回路矩阵和割集矩阵的计算机生成算法.....	18
2.5 节点分析法.....	20
2.5.1 线性电阻网络的节点方程.....	20
2.5.2 改进的节点分析法 .....	22
<b>第三章 离散时域仿真方法</b> .....	27
3.1 DC-DC 变换器的通用仿真模型 .....	27
3.2 离散时域仿真方法.....	28
3.2.1 状态方程描述 .....	29
3.2.2 非线性离散状态转移表示.....	29
3.2.3 平衡状态.....	30
3.3 算例.....	31
<b>第四章 MATLAB 语言及其在电源仿真中的应用</b> .....	35
4.1 MATLAB 语言简介 .....	35
4.2 MATLAB 语言的使用基础 .....	36
4.2.1 MATLAB 基本语句的结构 .....	36
4.2.2 变量赋值.....	36
4.2.3 向量运算.....	37



4.2.4	关系和逻辑运算 .....	37
4.3	电力电子器件的 MATLAB/SIMULINK 仿真模型 .....	38
4.3.1	理想开关仿真模型 .....	39
4.3.2	晶闸管的仿真模型 .....	41
4.4	MATLAB 在电源仿真中的应用 .....	43
4.4.1	开环的降压式变换器 SIMULINK 仿真 .....	43
4.4.2	闭环的降压式变换器 SIMULINK 仿真 .....	45
<b>第五章</b>	<b>Saber 混合信号设计仿真软件及其在电源仿真中的应用 .....</b>	<b>47</b>
5.1	Saber 软件的系统构成 .....	47
5.2	Saber 操作界面及仿真命令 .....	48
5.2.1	Saber 的操作界面 .....	48
5.2.2	Saber 仿真命令 .....	51
5.3	Saber 的 AIM 语言 .....	54
5.3.1	命令行工具、AIM 宏记录、应用程序日志 .....	55
5.3.2	AIM 基础 .....	57
5.3.3	AIM 处理绘图文件(Plot Files)、波形(Waveforms)、信号(Signals)及 图形(Graphs) .....	60
5.4	创建 Saber 用户仿真模型 .....	60
5.4.1	创建和修改仿真模型的图形符号 .....	60
5.4.2	MAST 模板 .....	63
5.5	使用 Saber 仿真程序进行功率变换器设计 .....	64
5.5.1	设计指标 .....	64
5.5.2	设计步骤 .....	65
5.6	混合信号仿真 .....	80
5.6.1	模拟与数字仿真的基础 .....	80
5.6.2	混合仿真器对系统初始状态的确定 .....	83
5.6.3	模型 .....	83
5.6.4	VHDL 硬件描述语言在电源仿真中的应用 .....	85
5.7	用 AIM 创建用户界面 .....	89
5.7.1	顶层窗口 .....	89
5.7.2	创建底框 .....	90
5.7.3	创建菜单 .....	91
5.7.4	创建输入 .....	93
5.7.5	创建图形窗口显示暂态分析结果 .....	96
5.7.6	添加超调量标签 .....	96
5.7.7	添加按钮 .....	96
5.7.8	子程序 .....	97
<b>第六章</b>	<b>PSpice 及其在电源仿真中的应用 .....</b>	<b>100</b>

6.1	PSpice 8.0 使用简介 .....	100
6.1.1	用 MicroSim Schematics 绘制原理图 .....	100
6.1.2	创建和使用自己的器件库 .....	100
6.2	PSpice 的电路及元器件描述 .....	104
6.2.1	电路描述 .....	104
6.2.2	输入格式 .....	104
6.2.3	电路描述语句 .....	105
6.2.4	常规元件描述语句 .....	105
6.2.5	理想受控元件描述语句 .....	112
6.2.6	半导体器件和模型 .....	116
6.2.7	元器件模型描述语句 .....	118
6.2.8	通用语句 .....	127
6.2.9	高级控制语句 .....	129
6.3	PSpice 主要分析类型 .....	132
6.3.1	直流分析 .....	132
6.3.2	交流小信号分析 .....	134
6.3.3	瞬态分析 .....	135
6.3.4	灵敏度分析 .....	137
6.3.5	容差分析 .....	137
6.3.6	不同温度分析 .....	142
6.4	参数库与子电路调用及收敛问题 .....	143
6.4.1	器件参数库 .....	143
6.4.2	子电路 .....	143
6.4.3	收敛性 .....	144
6.5	PSpice 的模块化和层次化设计 .....	145
6.5.1	基本概念 .....	145
6.5.2	层次电路设计的方法步骤 .....	146
6.5.3	层次电路的仿真 .....	147
6.6	电源仿真中的 PSpice 模型 .....	147
6.6.1	双开关 PWM 变换器模型 .....	147
6.6.2	PWM 控制器模型 .....	149
6.7	PSpice 在电源仿真中的应用 .....	151
6.7.1	升压式 Boost 变换器 DCM 工作模式 .....	151
6.7.2	降压式 Buck 变换器 .....	151
<b>第七章</b>	<b>分段线性系统仿真软件</b> .....	<b>156</b>
7.1	输入文件 .....	156
7.1.1	输入文件的一般规则 .....	156
7.1.2	输入文件的结构 .....	159

7.2	器件描述语句	159
7.2.1	节点名称	160
7.2.2	关于电压极性和电流方向的惯例	160
7.2.3	控制器件	160
7.2.4	器件类型	160
7.3	模型描述语句	167
7.3.1	分段线性电阻模型	168
7.3.2	分段线性电感和电容模型	169
7.3.3	简单开关	170
7.3.4	简单晶体管开关模型	170
7.3.5	简单逻辑器件模型	172
7.4	子电路的定义与调用	178
7.4.1	子电路定义	178
7.4.2	器件和节点定义的作用范围	180
7.4.3	外部节点和内部节点	180
7.4.4	子电路的调用	180
7.5	控制语句	181
7.5.1	选项控制语句	181
7.5.2	初始条件控制语句	182
7.5.3	变量打印控制语句	183
7.5.4	分析控制语句	184
7.6	SIMPLIS 的数据文件	184
7.7	SIMPLIS 仿真实例	185
7.7.1	带 RC 负载的单相半波整流电路	185
7.7.2	带 R 负载的三相半波整流电路	187
7.7.3	开环 Buck 变换器	188
7.7.4	闭环 Buck 变换器	189
7.7.5	带 RL 负载的可控硅整流电路	192
<b>第八章</b>	<b>IsSpice 及其在电源仿真中的应用</b>	<b>195</b>
8.1	引言	195
8.2	IsSpice 的组成及功能特点	195
8.2.1	电路图输入软件 SpiceNet	195
8.2.2	模型库	195
8.2.3	数/模混合电路仿真软件 IsSpice4	196
8.2.4	波形处理与分析软件 IntuScope	196
8.2.5	符号编辑器 Symbol Editor	196
8.2.6	文字编辑软件 IsEd	196
8.3	基本变换器仿真示例	197

8.3.1 降压式变换器 .....	197
8.3.2 升压式变换器 .....	198
8.4 仿真分析及收敛问题 .....	200
8.4.1 各种仿真分析介绍 .....	200
8.4.2 仿真选项 .....	203
8.4.3 收敛问题的解决 .....	203
<b>第九章 开关电源设计与仿真软件 POWER 4-5-6 .....</b>	<b>208</b>
9.1 POWER 4-5-6 的主设计窗口 .....	208
9.2 设计步骤 .....	211
<b>参考文献 .....</b>	<b>216</b>

# 第一章 电源仿真的方法

## 1.1 引言

随着电力电子技术的发展和应用,电能的精细变换已经成为现实,电源已经成为许多领域不可缺少的基本设备。在数字信息时代的 21 世纪,对电源的要求也相对提高。从基本的输出电压/电流稳定度、纹波系数、功率大小、效率、响应时间,到重量、体积、散热、维护、安装和寿命等诸多方面,人们在努力寻求最佳的电源设计理论和技术。

为了使电源系统的性能最佳,设计、试制和调试需要反复进行。但是,实物试制和调试是一项十分复杂和艰苦的工作,而且成本往往十分昂贵。随着大规模集成电路和电子计算机的迅速发展,电源的计算机仿真技术使电源设计低成本化成为现实。以电子计算机辅助分析与设计(CAA&CAD)为基础的电子设计自动化 EDA(Electronic Design Automatic)已经广泛应用于各类电系统的设计之中。电源的计算机仿真技术彻底改变了以往依靠人工计算、电路实验、实物试制和调试的传统设计方法,成为现代电源系统设计的关键技术之一。

### 1.1.1 计算机仿真技术

根据实际电路(或系统)建立模型,通过对模型的计算机分析、研究和实验,以达到研制和开发实际电路(或系统)的目的,这一过程称为计算机仿真(Simulation)。计算机仿真具有效率高、精度高、可靠性高和成本低等诸多优点,已经广泛应用于电力电子电路(或系统)的分析和设计中。国内外几个著名的电力电子中心都研究和开发了用于电力电子仿真的软件,建立了仿真基地。

计算机仿真不仅可以取代系统的许多繁琐的人工分析,减轻劳动强度,提高分析和设计能力,避免因为解析法在近似处理中带来的较大误差,而且还可以与实物试制和调试相互补充,最大限度地降低设计成本,缩短系统研制周期。此外,在系统设计初期,实际的系统并不存在,若要验证设计思想的正确性,最好的方法就是采用计算机仿真。但是,也要看到,计算机仿真在建模和计算的过程中都不可避免地存在误差,所以在仿真结束后,总是要进行必要的结果处理,或者研究更好的模型以及采用误差更小的计算方法。

电路的计算机仿真需要解决的基本问题是:① 建立电路方程和仿真模型;② 求解电路方程的算法。除此之外,可视化电路录入、仿真结果的分析与处理以及波形分析等问题也是计算机仿真必须很好解决的关键问题。

### 1.1.2 电源仿真方法

电源的计算机仿真必须建立仿真程序,而仿真程序离不开仿真方法。仿真程序分为通用仿真程序和专用仿真程序。通用仿真程序在电路(或系统)录入、仿真分析、波形处理等许多方面功能齐备,使用方便,但是可能存在仿真速度慢和缺乏某些专门的器件模型等缺

陷。专用仿真程序是为了克服通用仿真程序的不足而建立的针对某一类系统的专门仿真程序。专用仿真程序具有极强的针对性,因此可以使仿真速度很快。但是,专用仿真程序本身的开发周期往往较长,而且对程序本身正确性的验证也需要与通用仿真程序的结果进行比较。所以在决定引进通用仿真程序还是开发专用仿真程序时,要进行必要的论证。

本质上说,凡是能够用于非线性时变电路的仿真方法都可以用于电源的仿真。但是,由于构成电源系统的基本元件和基本控制单元有其自身的特点,数据分析和处理也有其自身的规律,所以完全照搬电路的仿真方法用于电源仿真将会付出较大的代价。基于此,近 30 多年来,电力电子领域的专家和学者在电力电子专用仿真方法的研究中付出了艰苦的努力,取得了丰硕的成果。

系统仿真首先必须建立系统仿真模型,获得描述系统的方程式,然后构造求解系统方程的算法。当系统比较简单或者系统的阶数较低时,通常可以得到系统的解析解;但当系统较复杂或系统的阶数较高时,要得到系统的解析解通常是不可能的,这时只有借助于数字仿真方法,才能够对系统设计进行仿真优化和验证。电源仿真与其他系统的仿真过程一样,但是,由于电源主电路由功率开关器件构成,它是一个典型的非线性时变系统,所以对其仿真还存在特殊的要求。

常用的电源仿真方法有如下五种:

- 小信号分析
- 离散时域仿真方法
- 等效电路法
- Laplace 变换法
- 周期时间序列分析

本章将对这五种方法进行简单的介绍。最常用的小信号分析和离散时域仿真方法还将分别在第二章和第三章作详细的介绍。

## 1.2 小信号分析

为了把握开关变换器的可靠性、稳定性及其动态性能,开关变换器的动态分析是十分重要的。早在 20 世纪 70 年代,人们就开始了开关变换器小信号频域模型的研究。小信号分析是要建立某一个工作点附近的近似小信号线性模型,该工作点由变换器参数、输入电压和负载决定。这样,就可以采用线性系统分析方法对开关变换器的调节控制回路进行设计。但是当输入电压或者负载发生变化时,由于工作点将发生变化,这时该分析方法将受到限制。当变换器的自然频率远小于开关频率的一半时,该方法带来的误差是可以接受的。

开关电源的小信号分析是分析电源变换器动态性能的有力工具,也是系统动态设计的依据。其显著优点在于物理概念清楚,可用伯德(Bode)图设计校正环节,因此该方法在电源的分析、仿真与设计中得到普遍重视。

小信号分析主要以状态空间平均法来建立变换器小信号线性模型。状态空间平均法(State-Space Averaging Method)是一种解析的分析方法,它是在 1976 年由 R. D. Middlebrook 提出来的,后又经过许多研究者的完善和发展,有了各种不同的形式,它对变换

器的分析和设计有很大影响。

### 1.3 离散时域仿真方法

开关电源是一个强非线性动态系统,要准确地找到其解析解是相当困难的。为此,1979年美国弗吉尼亚电力电子技术中心(VPEC)的李泽元教授首先提出了开关DC-DC变换器的离散时域仿真方法。80年代后期,清华大学蔡宣三教授对该方法进行了深入的研究。离散时域仿真方法是研究拓扑变化及元件参数变化对系统瞬态特性影响的有力工具。离散时域仿真方法的基本思路是:利用状态空间法列出非线性系统的分段线性方程,找出状态转移规律,并得出非线性差分方程,用计算机进行求解。运用该方法可以较精确地对开关电源进行数字分析。

### 1.4 等效电路法

在开关变换器中,开关元件的作用是使某一支路以一定的占空比接通或断开,所以这些元件的电压和电流平均值常常与电路中另外某条支路的电流或电压的平均值有关。因此,这些元件可近似用一个与占空比有关的受控源来代替。

等效电路法就是应用一个载波周期内平均值的概念,把开关变换器变为一个含有受控源的线性电路,然后用求解线性电路的方法对开关变换器进行稳态和小信号分析。

例如,图1.1(a)所示的三端开关器件电路可用图1.1(b)所示的受控源模型代替。

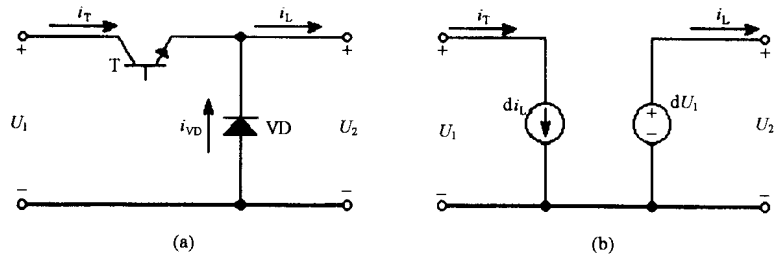


图 1.1 三端开关器件电路及其受控源模型

### 1.5 Laplace 变换法

Laplace 变换法首先写出网络的频域方程式,得出所求电压或电流的频域表达式,再将其进行 Laplace 反变换,从而得出网络解的时域表达式。

使用 Laplace 变换法对电源变换器进行仿真时,要写出系统的频域方程式是非常困难的。考虑到开关器件的特殊性,通常用时域频域混合方程式来描述电源变换器。

处理开关器件时,引入开关函数

$$x = \begin{cases} 1 & \text{(开关闭合)} \\ 0 & \text{(开关断开)} \end{cases}$$

这样,对图 1.2(a)所示的理想开关元件就可以写出如下的表达式:



$$xU_{ab} + (1-x)I_a = 0$$

对图 1.2(b)所示的三端开关器件电路,可以写出如下的时域表达式:

$$\begin{cases} xU_1 - xU_2 + (1-x)I_T = 0 \\ -yU_2 + (1-y)I_{VD} = 0 \end{cases}$$

式中 $[x \ y]$ 定义为

$$[x \ y] = \begin{cases} 1 & 0 & \text{(阶段 I)} \\ 0 & 1 & \text{(阶段 II)} \\ 0 & 0 & \text{(阶段 III)} \end{cases}$$

其中阶段 I 指晶体管 T 导通,二极管 D 不导通,阶段 II 指晶体管 T 不导通,二极管 D 导通,阶段 III 指晶体管 T 和二极管 D 都不导通。

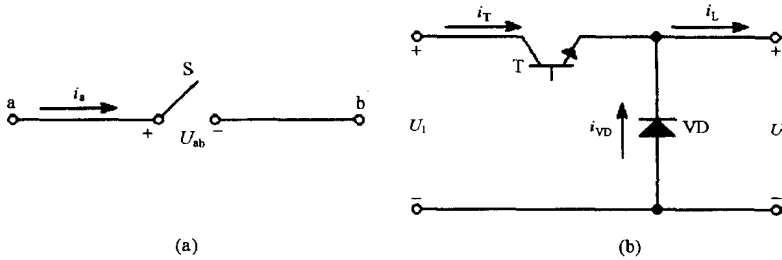


图 1.2 理想开关元件和三端开关器件电路

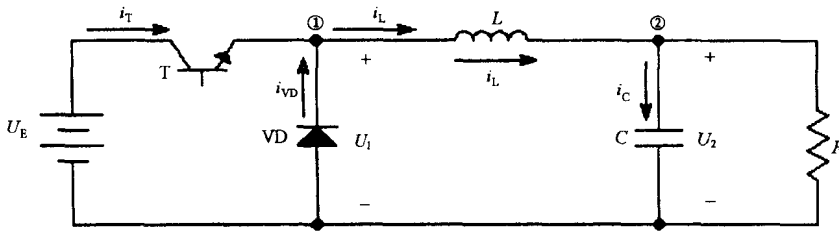


图 1.3 Buck 变换器

对于 Buck 变换器,首先写出时域频域混合方程式为

$$\begin{cases} xU_E - xU_1 + (1-x)I_T = 0 \\ -yU_1 + (1-y)I_{VD} = 0 \\ U_1(s) - U_2(s) - [sLI_L(s) - Li_L(t_0)] = 0 \\ I_T + I_{VD} - I_L = 0 \text{ 或 } I_T(s) + I_{VD}(s) - I_L(s) = 0 \\ I_L(s) - [sCU_2(s) - Cu_2(t_0)] - U_2(s)/R = 0 \end{cases}$$

在这五个方程式中,第一个和第二个方程是时域方程,第三个和第五个方程是频域方程,第四个方程的时域和频域方程形式是相似的。为了区别,方程中的频域量包含  $s$ 。

求解时可以总体求解,也可以分阶段求解。分阶段求解可得出三个阶段的解分别是阶段 I

$$\begin{cases} U_1 = U_E \\ I_{VD} = 0 \\ I_L(s) = I_T(s) = \frac{sC(U_E/s + Li_L(t_0)) + (U_E/s + Li_L(t_0))/R - Cu_2(t_0)}{s^2LC + sL/R + 1} \\ U_2(s) = \frac{sLCu_2(t_0) + U_E/s + Li_L(t_0)}{s^2LC + sL/R + 1} \end{cases}$$

阶段 II

$$\begin{cases} U_1 = 0 \\ I_T = 0 \\ I_L(s) = I_{VD}(s) = \frac{sCLi_L(t_0) + Li_L(t_0)/R - Cu_2(t_0)}{s^2LC + sL/R + 1} \\ U_2(s) = \frac{sLCu_2(t_0) + Li_L(t_0)}{s^2LC + sL/R + 1} \end{cases}$$

阶段 III

$$\begin{aligned} I_T &= 0 \\ I_{VD} &= 0 \\ U_1(s) &= -Li_L(t_0) + \frac{Cu_2(t_0)}{sC + 1/R} \\ I_L &= 0 \\ U_2(s) &= \frac{Cu_2(t_0)}{sC + 1/R} \end{aligned}$$

对以上的解进行 Laplace 反变换, 就可以得出时域表达式, 从而就可以对变换器进行仿真。进行 Laplace 反变换可采用 MATLAB 的函数 `ilaplace()`。

## 1.6 周期时间序列分析

周期时间序列分析仿真方法是一个稳态仿真方法。由该方法可以获得变换器在一个开关周期的稳态响应波形, 由此可以对其进行稳态特性研究及谐波分析。

开关变换器由于开关的接通和断开使得在不同的时刻变换器中各处的电流电压关系完全不同, 不能够用一个解析表达式来描述。但是, 在每一个时间点处, 电流电压的关系却有着确定的关系, 因此, 如果我们将电流和电压量用一个周期时间序列来表示, 则可以得出一个固定的矩阵方程式来描述变换器的特性。

周期时间序列分析仿真方法将随时间变化的有源电路部分单独进行处理, 而非时变线性无源网络单独处理, 很容易得出它的矩阵方程式, 其方法如下:

对于一个  $M$  端非时变线性无源网络, 正弦稳态方程式的一般形式如下:

$$U_{ik} = \sum_{m=0}^{M-1} Z_{imk} I_{mk}; \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (1.1)$$

式中  $i, m$  为节点编号;  $k$  为谐波次数;  $U_{ik}$  为第  $i$  个节点电位的第  $k$  次谐波电压相量,  $k=0$  时为直流分量;  $Z_{imk}$  为第  $i$  个节点与第  $m$  个节点之间的阻抗;  $I_{mk}$  为流入第  $m$  个节点的电流。