

Technology
实用技术

电路设计与仿真

IsSpice

电力电子分析与 IsSpice 模拟

郑培璿 编著



科学出版社

www.sciencep.com

图字: 01-2007-3107 号

内 容 简 介

本书系“电路设计与仿真”丛书之一。在全面分析电力电子学理论的基础上,书中列举了大量利用 IsSpice 软件进行电力电子与电源转换器仿真的应用实例。全书共 16 章,内容包括 IsSpice 系统与操作、功率半导体元件、单相及三相二极管整流器、单相及三相晶闸管整流器、电压源逆变器、电感切换电路、降压和升压型转换器、反激式和正激式转换器、桥式转换器、模拟问题与收敛性、副电路模型化设计等。

本书的读者对象包括电力电子领域的技术人员、相关专业高年级本科生、研究生和教师。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子分析与 IsSpice 模拟/郑培璜编著. —北京:科学出版社,2007
(电路设计与仿真)

ISBN 978-7-03-019289-9

I. 电… II. 郑… III. ①电力电子学-高等学校-教材 ②电路设计:
计算机辅助设计-应用软件, IsSpice-高等学校-教材 IV. TM1 TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097976 号

责任编辑:刘红梅 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张: 27 1/2

印数: 1—4 000 字数: 537 000

定 价: 46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

序 言

近年来,由于功率半导体元件的进步、微处理机的快速发展以及现代控制理论的应用,使得电力电子技术在现代的工程领域中已经占有相当重要的地位。毋庸置疑,电力电子是未来节能与环保的重点科技与明星产业。许多电子、电机相关领域的专科学校、技术学院和科技大学已经将电力电子列为重点发展的学科之一。许多教师在整合电力电子理论与实用技术的课程规划上相当用心,希望培养出来的学生真正具备产业界要求的应用设计与制作能力。然而,电力电子领域的产品都是高频大功率的产品,这些相关领域的研究、制作与测试,对学校的实验设备来说是一种重大的考验,对于教师的教学也是很大的负担。如何让学生对电力电子技术产生兴趣,并且对电路的特性作深入了解与探讨,笔者认为使用一套设计完善的仿真软件是很重要的。

本书除了进行电力电子学方面的理论分析之外,应用实例都利用 Intusoft 公司开发的 IsSpice,这是一套专为电力电子与电源转换器而设计的计算机辅助软件。本书的设计电路全部使用由原厂所提供的实际功率元件模型,有助于仿真电路的特性分析与实际电路的了解。在电源转换器电路方面则是利用一些商品化的 PWM IC,如 UC3842/3/4/5 系列、UC3524/5/6/7 系列、UC3825/3846 等等,并且搭配光耦合器与稳压 IC(如 TL431)来测试闭环特性。整个系统的输出使用动态负载来仿真,如使用电子式负载测量瞬时响应。笔者希望通过 IsSpice 这套仿真软件,为对电力电子技术感兴趣的学生、教师与业界工程师提供一种入门工具。

目 录

第 1 章 导 论

1.1	电力电子技术	3
1.2	功率半导体元件	3
1.3	交流-直流转换器	5
1.4	直流-直流转换器	7
1.4.1	线性电源转换器	7
1.4.2	切换式电源转换器	8
1.5	计算机仿真程序与重要性	11

第 2 章 IsSpice 系统与操作

2.1	IsSpice 的系统介绍	19
2.2	SpiceNet 电路图输入软件	20
2.3	SpiceNet 的电路结构	21
2.4	PreSpice 模型数据库	28
2.5	IsSpice4 实时模拟与 IntuScope 波形分析	30
2.6	IsSpice 的功能介绍	32

第 3 章 功率半导体元件

3.1	学习目标	41
3.2	原理说明	41
3.2.1	功率二极管	41
3.2.2	双极型晶体管(BJT)	42

3.2.3	金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET) ...	44
3.2.4	绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	46
3.2.5	缓冲电路	47
3.3	模拟分析步骤	50
3.3.1	电源用二极管的特性曲线	50
3.3.2	快速二极管的特性曲线	52
3.3.3	肖特基二极管的特性曲线	54
3.3.4	双极型晶体管(BJT)的特性曲线	56
3.3.5	MOSFET 的特性曲线	57
3.3.6	IGBT 的特性曲线	58
3.3.7	缓冲电路的设计(未加入缓冲电路)	59
3.3.8	缓冲电路的设计(加入 RCD 缓冲电路)	61
3.4	问题与讨论	63

第 4 章 单相二极管整流器

4.1	学习目标	67
4.2	原理说明	67
4.2.1	单相半波二极管整流器	67
4.2.2	单相全波二极管中央抽头式整流器	70
4.2.3	单相全波二极管整流器	71
4.2.4	无源功率因数校正	73
4.3	模拟分析步骤	74
4.3.1	单相半波二极管整流器(纯电阻性负载)	74
4.3.2	单相半波二极管整流器(增加滤波电感)	76
4.3.3	单相半波二极管整流器(增加滤波电容)	77
4.3.4	单相半波二极管整流器(滤波电感与电容)	79
4.3.5	单相全波中央抽头式二极管整流器(纯电阻性负载)	80
4.3.6	单相全波中央抽头式二极管整流器(增加滤波电容)	82
4.3.7	单相全波二极管桥式整流器(纯电阻性负载)	83
4.3.8	单相全波二极管桥式整流器(增加滤波电容)	86
4.3.9	单相全波二极管桥式整流器(滤波电感与电容)	89

4.3.10	1/2 部分输出电压平坦法电路	91
4.3.11	1/3 部分输出电压平坦法电路	94
4.4	问题与讨论	97

第 5 章 三相二极管整流器

5.1	学习目标	103
5.2	原理说明	103
5.2.1	三相半波二极管整流器	103
5.2.2	三相全波二极管整流器	104
5.3	模拟分析步骤	107
5.3.1	三相半波二极管整流器(纯电阻性负载)	107
5.3.2	三相半波二极管整流器(增加滤波电容)	108
5.3.3	三相半波二极管整流器(滤波电感与电容) ...	110
5.3.4	三相全波二极管整流器(纯电阻性负载)	112
5.3.5	三相全波二极管整流器(增加滤波电容)	115
5.3.6	三相全波二极管整流器(滤波电感与电容) ...	118
5.4	问题与讨论	121

第 6 章 单相晶闸管整流器

6.1	学习目标	127
6.2	原理说明	127
6.2.1	单相半波晶闸管整流器	127
6.2.2	单相全波晶闸管半控式整流器	128
6.2.3	单相全波晶闸管全控式整流器	129
6.3	模拟分析步骤	132
6.3.1	单相半波晶闸管整流器(纯电阻性负载)	132
6.3.2	单相半波晶闸管整流器(电阻与电感负载) ...	135
6.3.3	单相全波晶闸管半控式整流器(纯电阻性负载)	137
6.3.4	单相全波晶闸管半控式整流器(电阻与电感 负载)	140
6.3.5	单相全波晶闸管全控式整流器(纯电阻性负载)	143
6.3.6	单相全波晶闸管全控式整流器(电阻与电感	

负载).....	146
6.4 问题与讨论.....	149

第 7 章 三相晶闸管整流器

7.1 学习目标.....	155
7.2 原理说明.....	155
7.2.1 三相半波晶闸管整流器	155
7.2.2 三相全波晶闸管半控式整流器	156
7.2.3 三相全波晶闸管全控式整流器	159
7.3 模拟分析步骤.....	160
7.3.1 三相半波晶闸管整流器(纯电阻性负载)	160
7.3.2 三相半波晶闸管整流器(电阻与电感负载) ...	164
7.3.3 三相全波晶闸管半控式整流器(纯电阻性负载)	166
7.3.4 三相全波晶闸管半控式整流器(电阻与电感 负载).....	170
7.3.5 三相全波晶闸管全控式整流器(纯电阻性负载)	174
7.3.6 三相全波晶闸管全控式整流器(电阻与电感 负载).....	178
7.4 问题与讨论.....	181

第 8 章 电压源逆变器

8.1 学习目标.....	187
8.2 原理说明.....	187
8.2.1 单相双电压极性 PWM 电压源逆变器	187
8.2.2 单相单电压极性 PWM 电压源逆变器	188
8.2.3 三相方波电压源逆变器	189
8.2.4 三相正弦式 PWM 电压源逆变器	192
8.3 模拟分析步骤.....	193
8.3.1 单相双电压极性 PWM 电压源逆变器	193
8.3.2 单相单电压极性 PWM 电压源逆变器	196
8.3.3 三相方波电压源逆变器	199
8.3.4 三相正弦式 PWM 电压源逆变器	202

8.4 问题与讨论	205
-----------	-----

第 9 章 电感切换电路

9.1 学习目标	209
9.2 原理说明	209
9.2.1 使用纯电感的电感切换电路	209
9.2.2 电感切换电路使用电感与电阻	209
9.2.3 纯电感的电感切换电路外加二极管	210
9.2.4 电感切换电路的储能电感对电阻放电	211
9.2.5 电感切换电路的储能电感对电容充电	212
9.2.6 升降压型转换器	213
9.3 模拟分析步骤	219
9.3.1 电感切换电路使用纯电感	219
9.3.2 纯电感的电感切换电路使用电阻与电容 作保护	221
9.3.3 使用电感与电阻的电感切换电路	222
9.3.4 电感与电阻组成的电感切换电路用电阻与电容 作保护	223
9.3.5 电感切换电路使用纯电感外加二极管	226
9.3.6 电感切换电路的储能电感对电阻放电	227
9.3.7 电感切换电路的储能电感对电容充电	230
9.3.8 开环设计的升降压型转换器	232
9.4 问题与讨论	234

第 10 章 降压型转换器

10.1 学习目标	239
10.2 原理说明	239
10.2.1 连续电流模式	239
10.2.2 边界电流模式	242
10.2.3 不连续电流模式	243
10.3 模拟分析步骤	246
10.3.1 开环设计的降压型转换器(5V/4A)	246

10.3.2	闭环电压模式的降压型转换器(5V/4A)	249
10.3.3	闭环电流模式的降压型转换器(5V/4A)	253
10.4	问题与讨论	257

第 11 章 升压型转换器

11.1	学习目标	261
11.2	原理说明	261
11.2.1	连续电流模式	261
11.2.2	边界电流模式	264
11.2.3	不连续电流模式	265
11.3	模拟分析步骤	267
11.3.1	开环设计的升压型转换器	267
11.3.2	闭环电流模式的升压型转换器	269
11.4	问题与讨论	272

第 12 章 反激式转换器

12.1	学习目标	275
12.2	原理说明	275
12.2.1	连续电流模式	275
12.2.2	边界电流模式	279
12.2.3	不连续电流模式	280
12.3	模拟分析步骤	283
12.3.1	开环设计的反激式转换器(15V/10A)	283
12.3.2	闭环电流模式的反激式转换器(15V/10A)	287
12.3.3	开环设计的反激式转换器(5V/20A)	292
12.3.4	闭环电流模式的反激式转换器(5V/20A)	296
12.4	问题与讨论	301

第 13 章 正激式转换器

13.1	学习目标	307
13.2	原理说明	307

13.2.1	连续电流模式	307
13.2.2	边界电流模式	311
13.2.3	不连续电流模式	312
13.3	模拟分析步骤	312
13.3.1	开环设计的正激式转换器(15V/10A) ...	312
13.3.2	闭环电流模式的正激式转换器(15V/10A)	318
13.3.3	开环设计的正激式转换器(5V/20A) ...	323
13.3.4	闭环电流模式的正激式转换器(5V/20A)	327
13.4	问题与讨论	332

第 14 章 桥式转换器

14.1	学习目标	337
14.2	原理说明	337
14.2.1	推挽式转换器	337
14.2.2	半桥式转换器	340
14.2.3	全桥式转换器	343
14.3	模拟分析步骤	347
14.3.1	开环设计的推挽式转换器	347
14.3.2	闭环设计的推挽式转换器	350
14.3.3	开环设计的半桥式转换器	352
14.3.4	闭环设计的半桥式转换器	354
14.3.5	开环设计的全桥式转换器	356
14.3.6	闭环设计的全桥式转换器	358
14.4	问题与讨论	361

第 15 章 模拟问题与收敛性

15.1	仿真选项的设定	367
15.2	各种分析模式的介绍	367
15.2.1	瞬时分分析(Transient Analysis)	367
15.2.2	交流分析	370
15.2.3	直流电源扫描分析	370
15.2.4	傅里叶分析	371

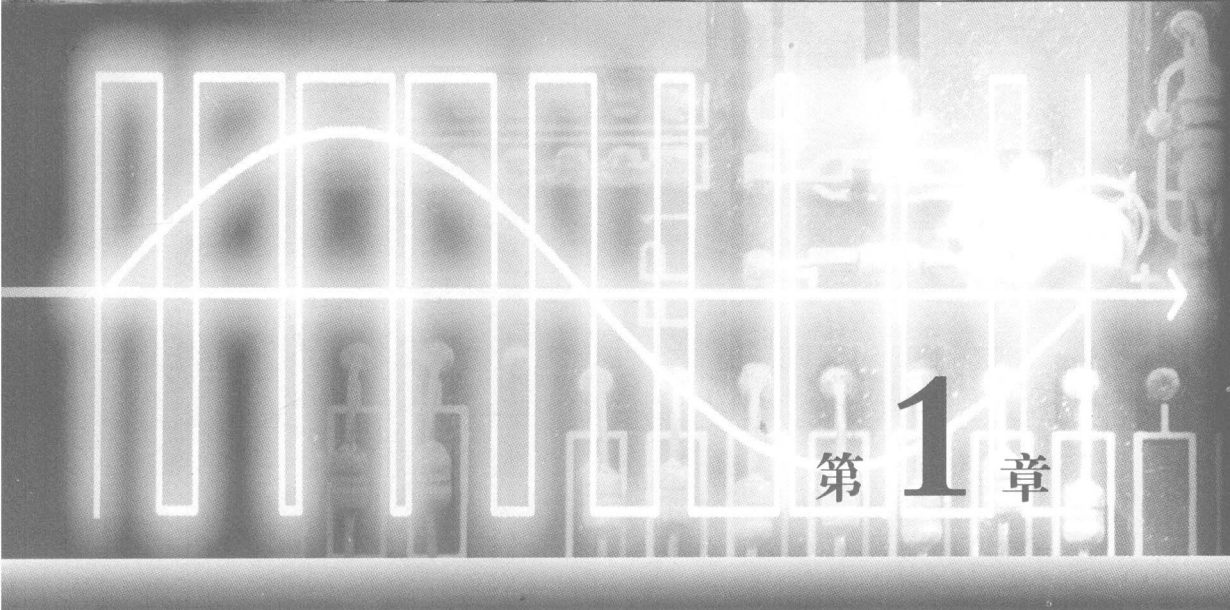
15.3	仿真选项的功能	371
15.4	如何使用收敛精灵	373
15.5	收敛问题的解决	379
15.5.1	直流收敛问题的解决方案	379
15.5.2	直流扫描收敛问题的解决方案	380
15.5.3	瞬时收敛问题的解决方案	380

第 16 章 副电路模型化设计

16.1	建立与取得元件模型	387
16.1.1	半导体模型	387
16.1.2	副电路模型	388
16.2	副电路的符号建立	390
16.3	副电路的模型建立	393
16.3.1	Make Subdrawing	394
16.3.2	直接由元件浏览器选取来建立模型	395
16.3.3	直接建立模型	397

附 录

A	SpiceNet 菜单与说明	403
B	IsSpice4 菜单与说明	408
C	Scope 菜单与说明	410
D	快捷键与元件符号	417
E	瞬时信号产生器	420



第 1 章

导 论

- 1.1 电力电子技术
- 1.2 功率半导体元件
- 1.3 交流-直流转换器
- 1.4 直流-直流转换器
- 1.5 计算机仿真程序与重要性

1.1 电力电子技术

自从 1956 年晶闸管问世,人类便进入了电力电子的时代。电力电子学是一门涵盖大功率电力与小功率电子的综合性学科,主要是运用大功率的电子元件来实现电能的转换,其最主要的目的就是节约能源。为了保护人类的生存环境和提高效率来节省有限的能源,因此造就了蓬勃快速发展的电力电子产品市场。电力电子技术是结合功率半导体元件的开关控制、拓扑结构的设计与系统控制的一门学科,其目的就是利用功率半导体元件对电源加以转换与控制,以符合各种负载的需求。电力电子技术是结合功率半导体元件、功率级

电路、电动机械与传动系统、电磁干扰防制技术、集成电路设计、控制理论、微处理器的应用、模拟与数字电子和计算机辅助设计技术等应用知识的综合技术。图 1.1 为电力电子技术与其他技术领域的关联图。近年来,由于功率半导体元件的进步、微处理机的快速发展以及现代控制理论的应用,使电力电子技术在现代工程领域中已经占有相当重要的地位,其应用领域包括工业、交通、商业、家电、电力系统、计算机通信、航空及军事等,使用项目涵盖了电热与感应加热、照明系统、太阳能电力转换、变频式家电、电子镇流器、交流与直流电源供应、不断电电源系统、电机驱动与控制、焊接与切割、功率因数校正与谐波补偿等。

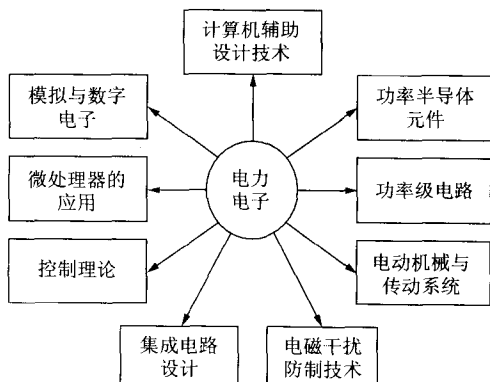


图 1.1 电力电子技术与其他技术领域的关联图

典型的电力电子设备是由各种电力转换器形成的功率电路组成的,而电力转换器是由功率半导体元件构成,在固定的控制模式下决定功率开关的导通与截止的时间,使负载能够稳定地运行。电力转换器根据不同的负载需求有不同的分类,大致可以分为交流-直流(AC/DC)、直流-直流(DC/DC)、直流-交流(DC/AC)与交流-交流(AC/AC)转换器四种。

1.2 功率半导体元件

电力电子技术得以发展,最主要的原因就是功率半导体元件的快速发展。从 20 世纪 60 年代的晶闸管(SCR),70 年代的双极型晶体管(BJT),80 年代的金属氧化物

半导体场效应晶体管(MOSFET)至目前的绝缘栅双极型晶体管(IGBT),都陆续地应用在电力电子的产品当中。由于固态半导体制造技术的进步,使功率半导体元件的切换频率、承受高电压与高电流的能力不断地提高。在电力电子与电源转换器的领域中,BJT、MOSFET 与 IGBT 常作为高频切换的功率元件,而二极管则常应用在整流电路中。

功率半导体元件在电力电子中主要扮演着开关的角色。然而,实际的功率开关并不是理想的。所谓理想的开关是在导通时没有阻抗,而在截止时的阻抗为无穷大,并且没有功率与切换速度的限制的开关。功率半导体元件常用的电压与电流范围如图 1.2 所示。在大于 10kHz 高频切换的应用中多以功率 MOSFET 为主,由于它是仅利用多数载流子作为传导的单载流子元件,在较高功率使用时,其导通损失较高,除非使用并联模块的技术,一般应用于 1kW 以下的场合。在小于 10kHz 中频切换的应用中多以功率 BJT 为主,其应用的功率范围比功率 MOSFET 更高,额定功率可以达到 10kW 以上。至于高功率的应用则属于 SCR(可控硅整流器)或是 GTO(可关断晶闸管)的应用范围,一般应用 SCR 的切换频率大多是以电源频率为主,若是使用 GTO 时,其切换频率可以达数百 Hz。图 1.3 所示为功率半导体元件常用的工作频率与额定容量范围。横轴是功率半导体元件的工作频率,纵轴是功率元件的额定电压与电流的乘积。在大功率应用方面,除了 SCR 与 GTO 的容量仍然不断地提升之外,中功率的 IGBT 则朝着功率提升与快速切换的应用发展。

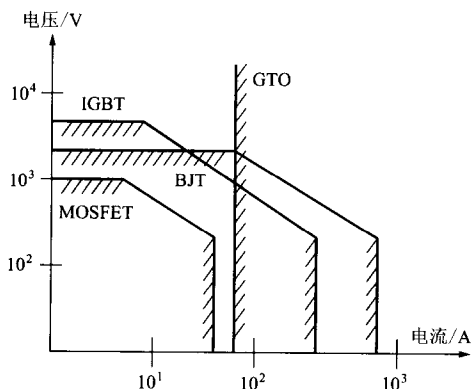


图 1.2 功率半导体元件常用的电压与电流范围

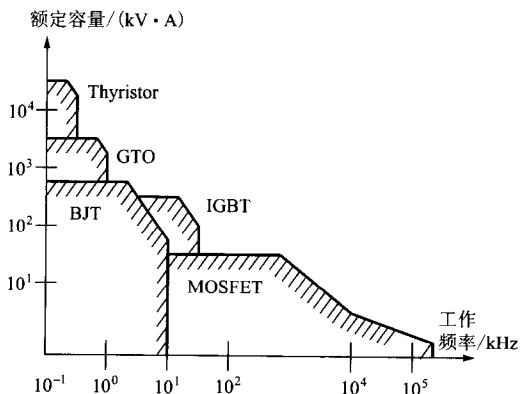


图 1.3 功率半导体元件常用的工作频率与额定容量范围

近年来,许多电源供应需求如个人计算机的 CPU 电源电压不断下降到约 3.3V,甚至低到 1.6V 左右。未来随着 CPU 的速度增加,低电源电压的需求也与日俱增。如果在设计中仍使用功率二极管来整流,则效率势必降低而无法满足市场的需求。因此,根据低电压的趋势,以肖特基二极管的低导通电压或功率 MOSFET 的低导通

电阻才能提高系统的整体效率。对于从事电力电子相关技术的研究与产品的开发、设计的工程师都必须对这些元件的特性作深入的了解,方能掌握电路的各种现象并加以控制,从而设计出具有符合客户要求的特性与规格的产品。

1.3 交流-直流转换器

传统的交流-直流转换器使用二极管或是晶体管的相位控制进行整流,为了配合后级的直流-直流或直流-交流转换器的输出特性,一般使用二极管整流器的占绝大多数。交流-直流转换器的输出端,一般是利用一个很大的电解电容将交流输入电压充电到峰值,并且在大电容还来不及完全放电时又开始进行充电,因而建立了稳定的直流电压,用来供应后级负载所需的能量。如图 1.4 所示。这种电路结构会使输入电流产生非正弦波的失真,也就是输入端的电流波形是一个短时间的尖锐的脉冲,同时造成功率因数大幅降低并产生谐波失真。

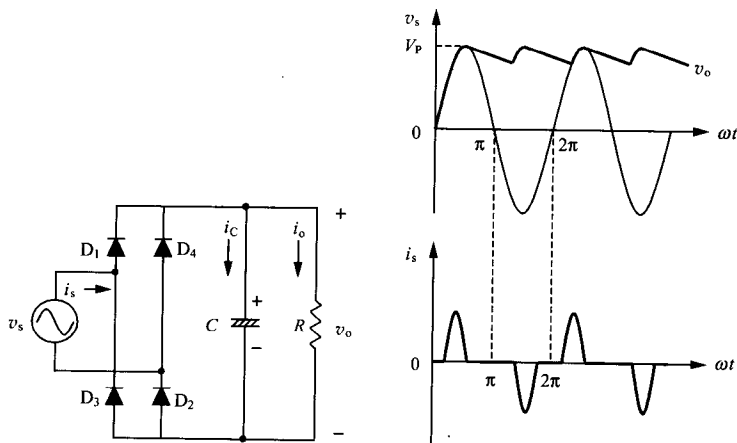


图 1.4 二极管桥式整流器电路与各点波形

想要实现商品化的目标就必须符合日益严格的国际安全规范,设计上就必须同时考虑功率因数与谐波失真的问题。目前常用的方式是在交流输入电源与直流-直流或直流-交流转换之间加入一级能够校正功率因数的电路,即是功率因数校正器。虽然说是用来校正功率因数,实际上所规范的是各级谐波量的大小与总谐波失真值。常用的功率因数校正器有三种,分别简单叙述如下。

1. 升压型功率因数校正器

升压型功率因数校正器是由一个桥式整流器与升压型直流-直流转换器组成的,如图 1.5 所示。升压型功率因数校正器的输出电压必须大于交流输入电压经过整流

后的峰值,所以当交流输入电压的范围是 $90\sim 264\text{VAC}$ 时,输出电压的直流电位必须大于最高输入电压的峰值 370V 。考虑商用电解电容的规格与容许度,通常将升压型功率因数校正器的输出电压设定在 400V 左右。

升压型功率因数校正器的电感位于输入侧,输入电流的变化率 di/dt 会受到输入电感的抑制,而噪声与电磁干扰也相对降低。当功率开关截止时,负载所需的能量由输入电源与储存在电感上的能量共同提供。而其他两种形式的功率因数校正电路,在一个工作周期中必定会有一段时间由电感单独供应负载所需的能量。因此,升压型功率因数校正器可使用较小的电感而达到较佳的电路特性,并减少电路的成本。

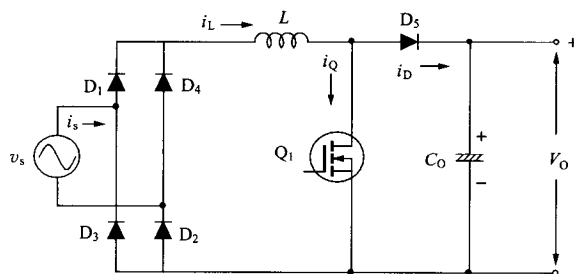


图 1.5 升压型功率因数校正电路

2. 降压型功率因数校正器

降压型功率因数校正器由一个桥式整流器与降压型直流-直流转换器组成,如图 1.6 所示。降压型功率因数校正器的输出电压必须小于交流输入电压经过整流后的峰值,而实际上却有一小段时间,输出电压大于交流输入电压。所以,功率因数校正的效果有其限制范围。

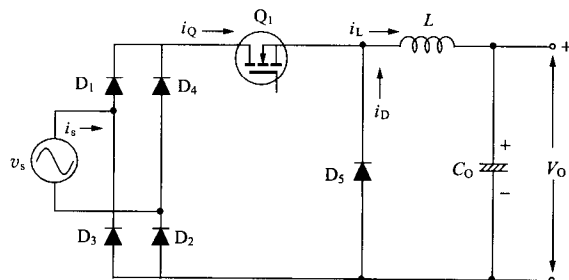


图 1.6 降压型功率因数校正电路

3. 反激式功率因数校正器

反激式功率因数校正器由一个桥式整流器与升降压型直流-直流转换器所组成,如图 1.7 所示。反激式电路就是升降压型转换器,其输出电压可以大于、等于或小于