

A detailed 3D perspective rendering of a power supply unit, showing its internal components like capacitors, transformers, and cooling fans. The unit is shown in a disassembled or semi-transparent state, revealing its complex internal structure. The background is a gradient of orange and white, with geometric shapes and patterns.

开关电源的 原理与设计

(修订版)

张占松 蔡宣三 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

开关电源的原理与设计

(修订版)

张占松 蔡宣三 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统论述 DC-DC 高频开关电源的工作原理与工程设计方法。主要包括: PWM 变换器和软开关 PWM 变换器的电路拓扑、原理、控制、动态分析及稳定校正; 功率开关元件 MOSFET、IGBT 的特性及应用; 智能功率开关变换器的原理与应用; 磁性元件的特性与设计计算方法; 开关电源中有源功率因数校正; 同步整流与并联均流等技术; PWM 开关电源的可靠稳定性与制作问题; 开关电源的数字仿真方法、计算机辅助优化设计和最优控制方法等。

编著者力图反映自 20 世纪 90 年代至今的国内外工程界与学术界在高频开关电源方面的进展和所取得的研究成果, 该书可作为国内高校有关专业的本科生与研究生的教材或参考书。

本书自 1998 年以来已多次重印, 本版是在原书的基础上做较大修订、充实后, 再版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源的原理与设计/张占松, 蔡宣三编著. —修订版. —北京: 电子工业出版社, 2004.9
ISBN 7-121-00211-6

I. 开… II. ①张…②蔡… III. ①开关电源—理论②开关电源—设计 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 079155 号

责任编辑: 龚立堇

印 刷: 北京东光印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 28.75 字数: 736 千字

印 次: 2004 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 45.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

修订版前言

《开关电源的原理与设计》一书出版五年来一直销售很好,也得到了众多专业人士的肯定,多次被专业书刊、学术论文列入参考文献,作者深感欣慰。但是同时也发现了书中的一些错漏,为此而深感遗憾。我们一方面感谢广大读者的包容,一方面盼望有机会校正。

此次出版社为满足读者的需要,规划出版《开关电源的原理与设计》(修订版)。我们在修订版中校正了已发现的错误,做了必要的补充。尽可能补充了开关电源的世界发展前沿动态、新的学术观点、设计方法,以及通过仪器仪表调整开关电源等内容。

曾记否?第一版绪言提出过五新、五高、五挑战。在新电子元器件、新电磁材料、新变换技术、新控制理论及新软件时代氛围下,使开关电源频率高、效率高、功率密度高、功率因数高和可靠性高,应用面迅速扩大。因此遇到了五个能否:

- (1)能否全面通过电磁兼容各项标准?
- (2)能否大规模稳定生产或快捷单件特殊生产?
- (3)能否组建大容量电源?
- (4)能否电气额定值更高(如功率因数)或更低(如输出电压)?
- (5)能否使外形更加小型化,以适应使用场所的要求?

这五个问题是开关电源能否在更广泛领域应用的关键,是五个挑战,五个动力和五个机遇。

进入 21 世纪以后,整体来看这几个“五”没有质的变化,只有量的变化。因此,修订版仍然是 4 篇 26 章。但是各个地方作了大量内容上补充,对下列问题作了专题补充:三电平拓扑、电源的可靠性、智能功率开关、闭环控制方法及稳定性判据等,另外通过近似方法确定校正网络参数等问题,补充了一些分析或可行的解决方法;对 EMI 滤波器、磁元件设计方法和大电容特性等,也做了补充,并增加了较多例题。

电子镇流器是一种 AC-AC 变换技术,但是功率因数校正和提高效率问题,与离线式开关电源技术相近。二者在开关元件和开关动作控制上有共同点。许多开关电源的研发机构也在关注绿色照明问题。修订版中对电子镇流器技术及分析做了补充。

为了引入新内容,精简了第一版中一些次要论述(如直流变压隔离器插入变换器、多脚集成开关器件、某些控制芯片及不常用的元件等),以节省篇幅。希望这些改动都能符合广大读者的需求。

编写第一版时得到了美国弗吉尼亚电力电子中心主任 Fred C. Lee 教授,中国台湾工业研究院能源所吴英秦、陈慕平先生,新竹清华大学潘晴财教授,南京航空航天大学邢岩副教授,武汉空军雷达学院郭文加、胡戎先生,珠海康威特通用电源有限公司,(美国)美信集成产品公司,广东顺德顺和通信设备有限公司,珠海金电电源工业有限公司等许多个人和单位的支持与帮助,在此再次表示衷心的感谢。

当时华南理工大学丘水生教授审阅了部分章节,广东工业大学彭端副教授,原广州电子仪器厂丘玉池高级工程师和华南理工大学林波涛博士对书的大部分章节做了校阅,广州电力工

业局张文斐工程师做了很多演算例题等有益的工作,还有清华大学电机系、广东工业大学自动化学院对本书的出版都给予了一定的关注和帮助。在此对上述单位和个人再次致以衷心的感谢。

修订后本书共有 4 篇 26 章。

第 1 篇第 1~10 章,简述了 PWM 开关变换器的基本原理。阐述了开关电源主电路拓扑、控制电路、智能功率开关等芯片及闭环稳定校正,介绍了功率 MOSFET、双极型晶体管和 IGBT 特性,介绍了较新的功率因数校正技术、并联均流技术和同步整流技术等,介绍了闭环稳定用仪表测量后估算校正网络参数的方法。在介绍了磁材料特性后,对磁元件设计介绍了 A_p 法、 K_G 法,并附有例题。

第 2 篇第 11~19 章,阐述脉冲宽度调制(PWM)开关变换器的设计与制作的几个常见问题。包括各种常见电路形式、磁元件设计、缓冲电路设计等,并附有例题。

第 3 篇第 20~24 章,介绍了软开关-PWM 变换器,移相全桥 ZVS-PWM 及有源钳位 ZVT-PWM 变换器的电路原理技术性能和特点。

第 4 篇第 25~26 章,介绍了开关电源的计算机仿真和计算机辅助优化设计方法,并给出了 DC-DC 桥式开关变换器主电路的最优设计和最优控制计算实例。

本书第 1~6 章、10 章和第 11~19 章由张占松教授执笔,第 7~9 章和第 20~26 章由蔡宣三教授执笔。

本书修订版得到浙江大学徐德鸿教授和台湾梁适安博士的帮助;孙炳达教授也审阅了部分自动控制理论的章节;《电源世界》杂志刘勇先生提供了一些新的科技信息;清华大学电机系、广东工业大学许多教师,以及 2001 级毕业设计梁汉荣小组、硕士生张洲均给予了支持,在此一并表示感谢。

本书后列出的有关开关电源的文献,其中不少在作者编写时做了参考,在此对文献作者表示感谢。

由于开关电源技术发展迅速,成书却颇费时日,因此,书的出版总是落后于国内外学术、技术的发展,这是作者引以为憾的。此外不少开关电源的文献未能提及或反映进去,书中见解也许有偏颇的地方,所有这些问题,敬请读者指正。

编著者
2004 年 6 月

目 录

第 1 篇 PWM 开关变换器的基本原理

第 1 章 开关变换器概论	(1)
1.1 什么是开关变换器和开关电源	(1)
1.2 DC-DC 变换器的基本手段和分类	(1)
1.3 DC-DC 变换器主回路使用的元件及其特性	(3)
1.3.1 开关	(3)
1.3.2 电感	(3)
1.3.3 电容	(4)
1.4 DC-DC 变换器发展历程、现状和趋势	(6)
1.4.1 开关电源技术发展的历程	(6)
1.4.2 20 世纪推动开关电源发展的主要技术	(6)
1.4.3 开关电源技术发展方向	(11)
1.4.4 大电容技术	(15)
第 2 章 基本的 PWM 变换器主电路拓扑	(16)
2.1 Buck 变换器	(16)
2.1.1 线路组成	(16)
2.1.2 工作原理	(16)
2.1.3 电路各点的波形	(17)
2.1.4 主要概念与关系式	(17)
2.1.5 稳态特性的分析	(24)
2.2 Boost 变换器	(27)
2.2.1 线路组成	(28)
2.2.2 工作原理	(28)
2.2.3 电路各点的波形	(28)
2.2.4 主要概念与关系式	(29)
2.2.5 稳态特性的分析	(36)
2.2.6 纹波电压的分析及减少方法	(38)
2.3 Buck-Boost 变换器	(40)
2.3.1 线路组成	(40)
2.3.2 工作原理	(40)
2.3.3 电路各点的波形	(41)
2.3.4 主要概念与关系式	(41)
2.3.5 优缺点	(44)
2.4 Cuk 变换器	(46)

2.4.1	线路组成	(47)
2.4.2	工作原理	(48)
2.4.3	电路各点的波形	(48)
2.4.4	主要概念与关系式	(50)
2.5	四种基本型变换器的比较	(52)
2.6	四种基本型三电平变换器	(55)
2.6.1	Buck 三电平变换器电路与工作原理	(55)
2.6.2	Buck 三电平变换器输出电压与输出电流的关系	(56)
2.6.3	滤波器设计	(58)
2.6.4	Boost、Buck-Boost、Cuk 三电平变换器	(59)
第3章	带变压隔离器的 DC-DC 变换器拓扑	(61)
3.1	变压隔离器的理想结构	(61)
3.2	单端变压隔离器的磁复位技术	(63)
3.3	自激推挽式变换器的工作原理	(67)
3.4	能量双向流动的 DC-DC 变压隔离器	(71)
3.5	隔离式三电平变换器	(72)
3.5.1	正激变换器 3L 线路	(72)
3.5.2	半桥、全桥变换器 3L 线路	(72)
第4章	变换器中的功率开关元件及其驱动电路	(74)
4.1	双极型晶体管	(74)
4.1.1	晶体管的开关过程	(74)
4.1.2	开关时间的物理意义及减小的方法	(75)
4.1.3	抗饱和技术	(76)
4.2	双极型晶体管的基极驱动电路	(76)
4.2.1	一般基极驱动电路	(76)
4.2.2	高压双极型晶体管基极驱动电路	(77)
4.2.3	比例基极驱动电路	(80)
4.3	功率场效应管	(81)
4.3.1	功率场效应管的主要参数	(82)
4.3.2	功率场效应管的静态特性	(84)
4.3.3	MOSFET 的体内二极管	(85)
4.4	功率场效应管的驱动问题	(86)
4.4.1	一般要求	(86)
4.4.2	MOSFET 的驱动电路	(87)
4.5	绝缘栅双极晶体管	(90)
4.5.1	IGBT 结构与工作原理	(90)
4.5.2	IGBT 的静态工作特性	(90)
4.5.3	IGBT 的动态特性	(91)
4.5.4	IGBT 的栅极驱动及其方法	(91)
4.6	开关元件的安全工作区及其保护	(95)
4.6.1	双极型晶体管二次击穿原因及对 SOA 的影响	(95)
4.6.2	安全工作区(SOA)	(96)

4.6.3	保护环节——RC缓冲器	(98)
第5章	磁性元件的特性与计算	(102)
5.1	概述	(102)
5.1.1	在开关电源中磁性元件的作用	(102)
5.1.2	掌握磁性元件对设计的重要意义	(102)
5.1.3	磁性材料基本特性的描述	(102)
5.1.4	磁心型号对照表	(106)
5.2	磁性材料及铁氧体磁性材料	(106)
5.2.1	磁心磁性能	(106)
5.2.2	磁心结构	(108)
5.3	高频变压器设计方法	(109)
5.3.1	变压器设计方法之一——面积乘积(AP)法	(109)
5.3.2	变压器设计方法之二——几何参数(K_G)法	(116)
5.4	电感器设计方法	(121)
5.4.1	电感器设计方法之一——面积乘积(AP)法	(121)
5.4.2	电感器设计方法之二——几何参数(K_G)法	(125)
5.4.3	无直流偏压的电感器设计	(129)
5.5	抑制尖波线圈与差模、共模扼流线圈	(131)
5.5.1	抑制尖波的电磁线圈	(131)
5.5.2	差模与共模扼流线圈	(133)
5.5.3	使用对绞线时干扰的抑制	(135)
5.5.4	使用电缆线时干扰的抑制	(135)
5.6	非晶、超微晶(纳米晶)合金软磁材料特性及应用	(136)
5.6.1	非晶合金软磁材料的特性	(136)
5.6.2	超微晶合金软磁材料的特性	(137)
5.6.3	非晶、超微晶合金软磁材料的应用	(137)
第6章	开关电源占空比控制芯片及集成开关变换器的原理与应用	(138)
6.1	开关电源系统的隔离技术	(138)
6.2	开关电源PWM控制芯片及智能功率开关	(140)
6.2.1	1524/2524/3524芯片简介	(141)
6.2.2	芯片的工作过程	(144)
6.3	适用于功率场效应管控制的IC芯片	(144)
6.3.1	1525A与1524的差别	(144)
6.3.2	1525A/1527A的应用	(146)
6.4	电流控制型脉宽调制器	(146)
6.4.1	UC1846/UC1847工作原理及方框图	(146)
6.4.2	1842/2842/3842 8脚脉宽调制器	(148)
6.5	智能功率开关及其应用	(151)
6.5.1	概述	(151)
6.5.2	工作原理	(151)
6.6	便携式设备中电源使用的集成块	(159)
6.6.1	简介	(159)

6.6.2	MAX863 芯片的应用	(164)
6.6.3	MAX624 芯片的应用及设计方法	(164)
第 7 章	功率整流管	(173)
7.1	功率整流二极管	(173)
7.1.1	功率整流二极管模型	(173)
7.1.2	功率二极管的主要参数	(173)
7.1.3	几种快速开关二极管	(175)
7.2	同步整流技术	(177)
7.2.1	概述	(177)
7.2.2	同步整流技术的基本原理	(178)
7.2.3	同步整流驱动方式	(180)
7.2.4	同步整流电路	(181)
7.2.5	SR-Buck 变换器	(182)
7.2.6	SR-正激变换器	(183)
7.2.7	SR-反激变换器	(185)
第 8 章	有源功率因数校正器	(186)
8.1	AC-DC 电路的输入电流谐波分量	(186)
8.1.1	谐波电流对电网的危害	(186)
8.1.2	AC-DC 变流电路输入端功率因数	(186)
8.1.3	对 AC-DC 电路输入端谐波电流限制	(188)
8.1.4	提高 AC-DC 电路输入端功率因数和减小输入电流谐波的主要方法	(188)
8.2	功率因数和 THD	(189)
8.2.1	功率因数的定义	(189)
8.2.2	AC-DC 电路输入功率因数与谐波的关系	(189)
8.3	Boost 功率因数校正器(PFC)的工作原理	(190)
8.3.1	功率因数校正的基本原理	(190)
8.3.2	Boost 有源功率因数校正器(APFC)的主要优缺点	(191)
8.4	APFC 的控制方法	(191)
8.4.1	常用的三种控制方法	(191)
8.4.2	电流峰值控制法	(192)
8.4.3	电流滞环控制法	(193)
8.4.4	平均电流控制法	(194)
8.4.5	PFC 集成控制电路 UC3854A/B 简介	(195)
8.5	反激式功率因数校正器	(198)
8.5.1	DCM 反激功率因数校正电路的原理	(198)
8.5.2	等效输入电阻 R_e	(198)
8.5.3	平均输出电流和输出功率	(199)
8.5.4	DCM 反激变换器等效电路平均模型	(200)
第 9 章	开关电源并联系统的均流技术	(201)
9.1	概述	(201)
9.2	开关电源并联系统常用的均流方法	(202)
9.2.1	输出阻抗法	(202)

9.2.2	主从设置法	(204)
9.2.3	按平均电流值自动均流法	(205)
9.2.4	最大电流法自动均流	(206)
9.2.5	热应力自动均流法	(207)
9.2.6	外加均流控制器均流法	(208)
第 10 章	开关电源的小信号分析及闭环稳定和校正	(210)
10.1	概述	(210)
10.2	电感电流连续时的状态空间平均法	(210)
10.3	电流连续时的平均等效电路标准化模型	(212)
10.4	电流不连续时标准化模型	(217)
10.5	复杂变换器的模型	(218)
10.6	用小信号法分析有输入滤波器时开关电源的稳定问题	(220)
10.7	开关电源控制原理及稳定问题	(222)
10.7.1	闭环及开环控制	(222)
10.7.2	开关电源结构框图	(222)
10.8	稳定判别式波德图绘制	(224)
10.8.1	常见环节的幅频特性和相频特性	(224)
10.8.2	快速绘制开环对数特性曲线的方法	(224)
10.8.3	用开环特性分析系统的动态性能	(225)
10.9	实测波德图的方法及相关设备	(225)
10.9.1	开环系统直接注入法	(225)
10.9.2	闭环回路直接注入法	(226)
10.10	测定波德图,确定误差放大器的参数	(227)
10.10.1	TL431 相关测定技术	(227)
10.10.2	提高稳定性的设计方法	(228)
10.10.3	参数变化影响趋势的分析	(233)

第 2 篇 PWM 开关变换器的设计与制作

第 11 章	反激变换器的设计	(237)
11.1	概述	(237)
11.1.1	电磁能量储存与转换	(237)
11.1.2	工作方式的进一步说明	(239)
11.1.3	变压器的储能能力	(239)
11.1.4	反激变换器的同步整流	(240)
11.2	反激式变换器的设计方法举例	(242)
11.2.1	电源主回路	(242)
11.2.2	变压器设计	(242)
11.2.3	设计 112W 反激变压器	(245)
11.2.4	设计中的几个问题	(249)
11.2.5	计算变压器的另一种方法	(250)
11.3	反激变换器的缓冲器设计	(254)

11.3.1	反激变换器的开关应力	(254)
11.3.2	跟踪集电极电压钳位环节	(255)
11.3.3	缓冲器环节工作波形	(256)
11.3.4	缓冲器参数的确定	(256)
11.3.5	低损耗缓冲器	(259)
11.4	双晶体管的反激变换器	(259)
11.4.1	概述	(259)
11.4.2	工作原理	(259)
11.4.3	工作特点	(261)
11.4.4	缓冲器	(261)
11.4.5	工作频率	(261)
11.4.6	驱动电路	(262)
11.4.7	变压器设计注意漏感和匝数	(262)
第12章	单端正激变换器的设计	(263)
12.1	概述	(263)
12.2	工作原理	(263)
12.2.1	电感的最小值与最大值	(264)
12.2.2	多路输出	(265)
12.2.3	能量再生线圈 P_2 的工作原理	(265)
12.2.4	单端正激变换器同步整流	(265)
12.2.5	正激变换器的优缺点	(266)
12.3	变压器设计方法	(267)
12.3.1	方法一	(267)
12.3.2	方法二	(270)
第13章	双晶体管正激变换器的设计	(274)
13.1	概述	(274)
13.1.1	线路组成	(274)
13.1.2	工作原理	(274)
13.1.3	电容 C 的作用	(275)
13.2	双晶体管正激变换器变压器设计	(275)
13.3	正激变换器的闭环控制及参数计算	(278)
13.3.1	UPC 1099 的极限使用值和主要电性能	(279)
13.3.2	UPC 1099 的应用	(280)
第14章	半桥变换器的设计	(286)
14.1	半桥变换器的工作原理	(286)
14.2	偏磁现象及其防止方法	(287)
14.2.1	偏磁的可能性	(287)
14.2.2	串联耦合电容改善偏磁性能	(287)
14.2.3	串联耦合电容的选择	(288)
14.2.4	阶梯式趋向饱和的可能性及其防止	(289)
14.2.5	直通的可能性及其防止	(291)
14.3	软启动及双倍磁通效应	(291)

14.3.1	双倍磁通效应	(291)
14.3.2	软启动线路	(291)
14.4	变压器设计	(292)
14.5	控制电路	(295)
第 15 章	桥式变换器的设计	(297)
15.1	概述	(297)
15.2	工作原理	(297)
15.2.1	概述	(297)
15.2.2	工作过程	(298)
15.2.3	缓冲器的组成及作用	(299)
15.2.4	瞬变时的双倍磁通效应	(299)
15.3	变压器设计方法	(299)
15.3.1	设计步骤及举例	(299)
15.3.2	几个问题	(303)
第 16 章	双驱动变压器推挽变换器的设计	(304)
16.1	概述	(304)
16.1.1	线路结构	(304)
16.1.2	工作原理	(304)
16.1.3	各点波形	(305)
16.2	开关功率管的缓冲环节	(306)
16.3	推挽变换器中变压器的设计	(306)
第 17 章	H7C1 为材质 PQ 磁心高频变压器的设计	(311)
17.1	损耗及设计原则简介	(311)
17.1.1	设计原则	(311)
17.1.2	满足设计原则的条件	(311)
17.2	表格曲线化的设计方法	(314)
17.2.1	表 17.1 的形成与说明	(316)
17.2.2	扩大表 17.1 的使用范围	(317)
第 18 章	电子镇流器的设计	(320)
18.1	概述	(320)
18.1.1	荧光灯	(320)
18.1.2	荧光灯的结构及伏安特性	(321)
18.1.3	高频电子镇流器的基本结构	(322)
18.2	半桥串联谐振式电子镇流器	(322)
18.3	带有源、无源功率因数电路的电子镇流器	(323)
18.3.1	有源功率因数校正电子镇流器	(323)
18.3.2	无源功率因数校正电子镇流器	(325)
第 19 章	开关电源设计与制作的常见问题	(327)
19.1	干扰与绝缘	(327)
19.1.1	干扰问题及标准	(327)
19.1.2	隔离与绝缘	(329)

19.2 效率与功率因数	(332)
19.2.1 高效率与高功率密度	(332)
19.2.2 高功率因数	(332)
19.3 智能化与高可靠性	(333)
19.4 高频电流效应与扁平变压器设计	(334)
19.4.1 趋肤效应和邻近效应的产生	(334)
19.4.2 扁平变压器的设计	(336)

第3篇 软开关-PWM变换器

第20章 软开关功率变换技术	(340)
20.1 硬开关技术与开关损耗	(340)
20.2 高频化与软开关技术	(341)
20.3 零电流开关和零电压开关	(343)
20.4 谐振变换器	(344)
20.5 准谐振变换器	(345)
20.6 多谐振变换器概述	(346)
第21章 ZCS-PWM和ZVS-PWM变换技术	(348)
21.1 ZCS-PWM变换器	(348)
21.1.1 工作原理	(348)
21.1.2 运行模式分析	(349)
21.1.3 分析	(350)
21.1.4 ZCS-PWM变换器的优缺点	(350)
21.2 ZVS-PWM变换器	(351)
21.2.1 工作原理	(351)
21.2.2 运行模式分析	(352)
21.2.3 分析	(353)
21.2.4 ZVS-PWM变换器的优缺点	(353)
第22章 零转换-PWM软开关变换技术	(354)
22.1 零转换-PWM变换器	(354)
22.2 ZCT-PWM变换器	(354)
22.2.1 工作原理	(354)
22.2.2 运行模式分析	(355)
22.2.3 ZCT-PWM变换器的优缺点	(356)
22.2.4 数例分析	(356)
22.3 三端ZCT-PWM开关电路	(357)
22.4 ZVT-PWM变换器	(358)
22.4.1 工作原理	(358)
22.4.2 运行模式分析	(360)
22.4.3 ZVT-PWM变换器的优缺点	(360)
22.4.4 应用举例	(360)

22.4.5	三端零电压开关电路	(361)
22.4.6	双管正激 ZVT-PWM 变换器	(361)
第 23 章	移相控制全桥 ZVS-PWM 变换器	(363)
23.1	DC-DC FB ZVS-PWM DC-DC 变换器的工作原理	(363)
23.2	PSC FB ZVS-PWM 变换器运行模式分析	(365)
23.3	PSC FB ZVS-PWM 变换器几个问题的分析	(366)
23.3.1	占空比分析	(366)
23.3.2	PSC FB ZVS-PWM 变换器两桥臂开关管的 ZVS 条件分析	(367)
23.4	PSC FB ZCZVS-PWM 变换器	(367)
第 24 章	有源钳位软开关 PWM 变换技术	(370)
24.1	概述	(370)
24.2	有源钳位电路	(370)
24.3	有源钳位 ZVS-PWM 正激变换器稳态运行分析	(372)
24.4	有源钳位并联交错输出的反激变换器	(374)
24.5	有源钳位反激-正激变换器	(376)

第 4 篇 开关电源的计算机辅助分析与设计

第 25 章	开关电源的计算机仿真	(378)
25.1	电力电子电路的计算机仿真技术	(378)
25.1.1	计算机仿真技术	(378)
25.1.2	电路仿真分析(建模)方法	(378)
25.1.3	SPICE 和 PSPICE 仿真程序	(379)
25.2	用 SPICE 和 PSPICE 通用电路模拟程序仿真开关电源	(380)
25.2.1	概述	(380)
25.2.2	功率半导体开关管的 SPICE 仿真模型	(381)
25.2.3	控制电路的 SPICE 仿真模型	(384)
25.2.4	正激 PWM 开关电源的 SPICE 仿真	(387)
25.2.5	推挽式 PWM 开关电源的 PSPICE 仿真及补偿网络参数优化选择	(391)
25.3	离散时域法仿真	(396)
25.3.1	概述	(396)
25.3.2	数值法求解分段线性网络的状态方程	(397)
25.3.3	求解网络拓扑的转换时刻(边界条件)	(398)
25.3.4	非线性差分方程(大信号模型)	(399)
25.3.5	小信号模型	(400)
25.3.6	程序框图	(401)
25.3.7	仿真计算举例	(403)
第 26 章	开关电源的最优设计	(406)
26.1	概述	(406)
26.1.1	可行设计	(406)
26.1.2	最优设计	(406)

26.1.3	开关电源的主要性能指标	(406)
26.2	工程最优化的基本概念	(407)
26.2.1	优化设计模型	(407)
26.2.2	设计变量	(408)
26.2.3	目标函数	(408)
26.2.4	约束	(409)
26.2.5	优化数学模型的一般形式	(410)
26.2.6	工程优化设计的特点	(410)
26.3	应用最优化方法的几个问题	(411)
26.3.1	最优解的性质	(411)
26.3.2	初始点的选择	(411)
26.3.3	收敛数据	(411)
26.3.4	变量尺度的统一	(412)
26.3.5	约束值尺度的统一	(412)
26.3.6	多目标优化问题	(413)
26.4	DC-DC 桥式开关变换器的最优设计	(413)
26.4.1	DC-DC 半桥式 PWM 开关变换器主要电路的优化设计	(413)
26.4.2	开关、整流滤波电路的优化设计数学模型	(414)
26.4.3	变压器的优化设计数学模型	(415)
26.4.4	半桥 PWM 开关变换器优化设计的实现	(417)
26.4.5	5V/500W 输出 DC-DC 半桥 PWM 开关变换器优化设计举例	(418)
26.4.6	DC-DC 全桥 ZVS-PWM 变换器主电路的优化设计	(420)
26.5	单端反激 PWM 开关变换器的优化设计	(421)
26.5.1	数学模型概述	(421)
26.5.2	多路输出等效为一路输出的方法	(422)
26.5.3	优化设计举例	(423)
26.6	PWM 开关电源控制电路补偿网络的优化设计	(424)
26.6.1	概述	(424)
26.6.2	开关电源瞬态响应特性简介	(425)
26.6.3	开关变换器的频域特性	(426)
26.6.4	PWM 开关变换器小信号模型	(428)
26.6.5	瞬态优化设计数学模型	(430)
26.6.6	计算举例	(433)
26.7	DC-DC 全桥移相式 ZVS-PWM 开关电源补偿网络的最优设计	(434)
26.7.1	主电路及电压、电流波形	(434)
26.7.2	FB ZVS-PWM 变换器小信号模型	(435)
26.7.3	FB ZVS-PWM 变换器主电路传递函数及频率特性	(437)
26.7.4	FB ZVS-PWM 开关电源补偿网络最优设计模型	(438)
26.7.5	典型设计举例	(441)
	参考文献	(443)

第 1 篇 PWM 开关变换器的基本原理

第 1 章 开关变换器概论

1.1 什么是开关变换器和开关电源

电源有如人体的心脏,是所有电设备的动力,但电源却不像心脏那样形式单一。因为,标志电源特性的参数有功率、电压、频率、噪声及带负载时参数的变化等;在同一参数要求下,又有体积、重量、形态、效率、可靠性等指标。人们可按此去“塑造”和完美电源,因此电源的形式是极多的。本书重点介绍开关电源的原理及其设计方法。

在有些情况下,一般电力(如市电)要经过转换才能符合使用的需要。例如,交流转换成直流,高电压变成低电压等。这一过程有人形象地比喻为“粗电”炼为“精电”,“粗电”炼为“精电”后才好使用。

按电力电子的习惯称谓,AC-DC(理解成 AC 转换成 DC,其中 AC 表示交流电,DC 表示直流电)称为整流(包括整流及离线式变换),DC-AC 称为逆变,AC-AC 称为交流-交流直接变频(同时也变压),DC-DC 称为直流-直流变换。为达到转换目的,手段是多样的。20 世纪 60 年代前,研发了半导体器件,并以此器件为主实现这些转换。电力电子学科从此形成并有了近 30 年的迅速发展。所以,广义地说,凡用半导体功率器件作为开关,将一种电源形态转变成为另一形态的主电路都叫做开关变换器电路;转变时用自动控制闭环稳定输出并有保护环节则称开关电源(Switching Power Supply)。开关电源主要组成部分是 DC-DC 变换器,因为它是转换的核心,涉及频率变换。目前 DC-DC 变换中所用的频率提高最快,它在提高频率中碰到的开关过程、损失机制,为提高效率而采用的方法,也可作为其他转换方法参考。

值得指出,常见到离线式开关变换器(Off-line Switching Converter)名称,是 AC-DC 变换,也常称开关整流器;它不单是整流的意义,而且整流后又做了 DC-DC 变换。所谓离线并不是变换器与市电线路无关的意思,只是变换器中因有高频变压器隔离,使输出的直流离(开了市)线的缘故,所以称离线式开关变换器。

1.2 DC-DC 变换器的基本手段和分类

把直流电压变换为另一数值的直流电压最简单办法是串联一个电阻,这样不涉及变频的问题,显得很简单,但是效率低。用一个半导体功率器件作为开关,使带有滤波器(L 或 / 和 C)的负载线路与直流电压一会儿接通,一会儿断开,则负载上也得到另一个直流电压,这就是 DC-DC 的基本手段,类似于“斩波”(Chop)作用。

一个周期 T_s 内,电子开关接通时间 t_{on} 所占整个周期 T_s 的比例,称接通占空比 D , $D = \frac{t_{on}}{T_s}$; 断开时间 t_{off} 所占 T_s 比例,称断开占空比 D' , $D' = \frac{t_{off}}{T_s}$ 。很明显,接通占空比越大,负载上

电压越高; $\frac{1}{T_s} = f_s$ 称开关频率, f_s 越高, 负载上电压也越高。这种 DC-DC 变换器中的开关都在某一固定频率下(如几百千赫兹)工作, 这种保持开关频率恒定, 但改变接通时间长短(即脉冲的宽度), 使负载变化时, 负载上电压变化不大的方法, 称脉宽调制法(Pulse Width Modulation, 简称为 PWM)。由于电子开关按外加控制脉冲而通断, 控制与本身流过的电流、二端所加的电压无关, 因此电子开关称为“硬开关”。很明显, 由于硬开关关断和开通时, 开关上同时存在电压、电流, 损耗是比较大的, 但无论如何比串联电阻变换方法损耗小得多。这就是开关电源的优点之一。

凡用脉宽调制方式控制电子开关的开关变换器, 称为 PWM 开关变换器。它是以使用“硬开关”为主要特征的。

另一类称之为软开关。凡用控制方法使电子开关在其两端电压为零时导通电流, 或使流过电子开关电流为零时关断, 此开关称为软开关。软开关的开通、关断损耗理想值为零。由于损耗小, 开关频率可提高到兆赫级, 开关电源体积、重量显著减小。

可用谐振(Resonance)的方法使电子开关上电压或电流为零, 谐振分为串联谐振和并联谐振。在开关电源电路中加的电压是直流电压, 直流电压加在串联的 LC 时, 电路中电流按正弦规律无阻尼振荡, 其频率即电路的谐振频率, 或称振荡频率。利用谐振现象, 电子开关器件两端电压按正弦规律振荡, 当振荡到零时, 使电子开关导通, 流过电流, 此法称零电压开通(Zero Voltage Switching 简称 ZVS)。同理, 当流过电子开关器件的电流振荡到零时, 使电子开关断开, 此法称为零电流关断(Zero Current Switching 简称 ZCS)。

利用谐振现象, 使电子开关器件上电压或电流按正弦规律变化, 以创造零电压开通或零电流关断的条件, 以这种技术为主导的变换器称谐振变换器, 它有串联和并联谐振变换器两种。如果在桥式变换器(用谐振式方法控制)桥的输出端为串联 LC 网络, 再接变压器原边绕组(包括带副边整流电路), 称为串联谐振变换器。在桥式变换器串联 LC 网络的电容两端并联变压器原边绕组(包括带副边整流电路), 称为并联谐振变换器。

由于正向和反向 LC 回路值不一样, 即振荡频率不同, 电流幅值也不同, 所以振荡不对称。一般正向正弦半波大于负向正弦半波, 所以常称为准谐振。无论是串联 LC 网络, 或并联的 LC 网络都会产生准谐振。

利用准谐振现象, 使电子开关器件上的电压或电流按正弦规律变化, 从而创造了零电压或零电流的条件, 以这种技术为主导的变换器称为准谐振变换器。在单端、半桥或全桥变换器中, 利用寄生电感和电容(如变压器漏感, 半导体功率管或整流管的结电容)或外加谐振电感和电容, 可得到相应的准谐振变换器。

谐振回路、参数可以超过两个, 例如三个或更多, 称为多谐振变换器。

为保持输出电压不随输入电压变化而变化, 不随负载变化而变化(或基本不变), 谐振、准谐振和多谐振变换器主要靠调整开关频率, 所以是调频系统。

调频系统不如 PWM 开关那样易控, 加上谐振、准谐振、多谐振电路谐振电压(或电流)峰值高, 开关受的应力大, 因此这几年热门的研究课题是零开关-PWM 变换器和零转换-PWM 变换器。

零开关-PWM 变换器是指在准谐振变换器中, 增加一个辅助开关控制的电路, 使变换器一周期内, 一部分时间按 ZCS 或 ZVS 准谐振变换器工作, 另一部分时间按 PWM 变换器工作。前者称 ZCS-PWM 变换器, 后者称为 ZVS-PWM 变换器。这样, 变换器既有电压过零(或电流