

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

开关变换器分析与设计

刘树林 刘 健 编著

机械工业出版社

本书以开关变换器的分析与设计为主线,系统论述了构成开关变换器的主要元件的原理和特性,各类开关变换器的组成原理、分析方法、控制方法及设计方法,开关变换器发展中面临的问题及新技术。内容主要包括:半导体功率器件及其驱动电路,磁性材料的特性与分类及磁性元件的应用,非隔离与隔离开关变换器的组成原理、分析和设计方法,开关变换器的缓冲钳位电路,电压控制型开关变换器的稳定性分析及补偿网络设计,电流控制型开关变换器及其斜坡补偿技术,电能质量问题与功率因数校正技术,开关变换器的高频损耗问题与软开关技术,开关变换器的并联技术和均流问题,低压大电流与同步整流技术等。

全书自成体系,便于自学,适合作为电气工程、电子工程、控制工程等相关专业研究生及高年级本科生的教材或教学参考书;也可供从事开关电源研究、开发、生产和应用的工程技术人员和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

开关变换器分析与设计/刘树林,刘健编著. —北京:机械工业出版社, 2010.9

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 31877 - 4

I. ①开… II. ①刘… ②刘… III. ①开关-变换器 IV. ①TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第177274号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:于苏华 责任编辑:姚光明 版式设计:霍永明
责任校对:李 婷 封面设计:姚 毅 责任印制:杨 曦
北京蓝海印刷有限公司印刷
2011年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·17.5印张·432千字
标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 31877 - 4
定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

前 言

开关变换器是现代电能变换技术的核心组成部分，也是各类开关电源、变频器、UPS、光伏发电、风能发电、LED 照明等系统的基本组成单元，广泛应用于电力、通信、家电、铁路交通、汽车电子、工业控制、仪器仪表、航空、航天、航海等领域。近几十年来，开关变换技术取得了举世瞩目的发展：构成开关变换器的关键元件——功率半导体器件，从不可控到半控，再发展至今普遍采用的全控性开关器件；开关变换器已由当初的全分立元件模拟控制发展到今天的全数字集成控制；开关变换器的工作频率从几百 Hz 提高到几 MHz；单个开关变换器的输出功率从几瓦增大到几十千瓦，甚至几百千瓦；开关变换器的效率从约 70% 提高到 98% 以上；……。开关变换技术取得的一次又一次突破，归因于半导体工业与电子信息技术的高速发展及业界各位前辈、专家、学者和同仁孜孜不倦的不懈努力和追求。

开关变换技术内容繁多、发展迅猛，而《开关变换器分析与设计》作为一本基础读物，不可能包罗万象，也不可能反映开关变换技术发展的所有成就，恳请广大读者谅解。《开关变换器分析与设计》旨在论述各类基本开关变换器的工作原理及其分析方法、控制方法和设计方法，相关内容是从事电能变换技术及相关产品开发的工程技术人员和管理人员必须掌握的基础知识。考虑到本书的系统性和相对独立性，作者在内容安排上首先介绍了必需的功率半导体器件及磁性材料和磁性元件方面的基本知识，为后续章节内容的学习奠定必要的基础；再结合图表和波形论述各类开关变换器的结构、原理及其性能指标参数与器件参数之间的关系；然后介绍开关变换器的控制技术与稳定性及其闭环控制参数的设计方法和斜坡补偿技术；最后简要阐述开关变换器发展中面临的问题及新技术，如功率因数校正技术、软开关技术、均流技术、同步整流技术等。

依据是否电气隔离，开关变换器可分为非隔离和隔离两类：非隔离的基本开关变换器包括 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk、Sepic 和 Zeta 共六类；而隔离的开关变换器包括单管正激与双管正激变换器、单管反激与双管反激变换器、推挽型变换器、半桥和全桥变换器及各类组合开关变换器等。考虑到选材的实用性，并为了避免赘述及占用太多篇幅，在内容的选取和编排上进行了如下处理：

六类非隔离的基本开关变换器中，主要涉及 Buck、Boost 和 Buck-Boost 变换器：对于 Buck 和 Boost 变换器，本书进行了深入详尽的分析；而对于 Buck-boost 变换器，由于其分析方法和内容与 Boost 变换器极为相似，因此仅通过列表与 Buck 和 Boost 变换器的有关内容进行了对比。

隔离开关变换器中，单管正激和双管正激、推挽、半桥及全桥变换器属于 Buck 变换器家族，而单管反激和双管反激变换器属于 Buck-boost 变换器家族，因此，在对隔离开关变换器进行具体论述时，仅对其基本组成、工作波形、工作原理及一些相关特定问题进行了详细分析，而对其基本关系式及主要元件参数的设计则参照对应非隔离开关变换器，仅以列表的形式给出，便于读者及工程技术人员比较及应用时参考。

本书以开关变换器的分析及设计为主线，论述的重点放在定性阐明开关变换器工作的物

理过程、常用的基本概念及性能参数的物理意义上。尽可能避免重复的公式推导，文字叙述通俗易懂，主要关系式及元件参数设计要求均综合在各章节的表格中，从而使本书主题和重点更突出、更具可读性，特别便于自学及工程设计参考。

作者的相关研究工作及本书的出版得到国家自然科学基金（50977077）、国家科技部专项计划（2009GJG00020）、陕西省及西安市工业发展计划研究基金及陕西省重点学科建设项目等的资助，在此表示感谢。

在成书的过程中，博士生宋先文、钟久明及硕士生李艳、曹小生、张允武、杨晓、寇王娜、张静、张雪、刘丽娟、周小波、樊文斌、汪超、余倩玮、肖华、文美娟、战美、魏鹏伟、郭俊峰、薛少雄等同学承担了部分内容的组织及文字、图表的校对处理工作，在此一并表示感谢。

在本书的编写过程中，作者参阅了大量有关开关变换技术的论文、书籍和资料，并从中吸收了一些精彩描述，使得本书的内容更系统、更丰富、更完善，作者在成书之际特别对所引用参考文献的作者表示诚挚的感谢和崇高的敬意！

书中融入了作者开展相关研究所取得的一些进展（内容分布在第4~9章），特别是第4章中的部分概念和分析方法是首次提出，难免存在不妥之处；同时由于作者水平有限，加之编写时间仓促，书中肯定存在一些不足或错误，恳请专家和广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电能变换技术与开关变换器	1
1.2 开关变换器的基本组成和原理	2
1.3 开关变换器的调制技术及其特点	2
1.3.1 PWM 技术	3
1.3.2 PFM 技术与混合控制	3
1.3.3 SPWM 技术	3
1.4 开关变换器系统的性能指标和功能要求	5
1.4.1 电气性能指标	5
1.4.2 电磁兼容性指标	7
1.4.3 保护功能要求	8
第 2 章 功率半导体器件及其驱动电路	9
2.1 引言	9
2.1.1 功率半导体器件的发展历程	9
2.1.2 功率半导体器件的分类	11
2.2 功率二极管	12
2.2.1 二极管的结构和工作原理	12
2.2.2 二极管的开关特性	15
2.2.3 二极管的主要参数	18
2.2.4 功率二极管的主要类型、特点和应用场合	19
2.3 GTR	20
2.3.1 GTR 的结构、工作原理和分类	20
2.3.2 GTR 的输出特性与击穿特性	21
2.3.3 GTR 的饱和特性与开关特性	22
2.3.4 GTR 的大电流特性与二次击穿	25
2.3.5 GTR 的最大工作电流与安全工作区	26
2.3.6 GTR 的温度特性与并联应用	27
2.3.7 GTR 的应用注意事项及保护措施	27
2.4 功率 MOSFET	28
2.4.1 MOSFET 的基本结构和工作原理	28

2.4.2 功率 MOSFET 的结构和分类	30
2.4.3 功率 MOSFET 的静态特性与动态特性	31
2.4.4 功率 MOSFET 的导通电阻及体内二极管	33
2.4.5 功率 MOSFET 的主要参数	36
2.4.6 功率 MOSFET 的优缺点、应用注意事项及保护措施	37
2.5 IGBT	38
2.5.1 IGBT 的结构和工作原理	39
2.5.2 IGBT 的静态特性	40
2.5.3 IGBT 的动态特性	40
2.5.4 IGBT 的闩锁效应	41
2.5.5 IGBT 的串联和并联	41
2.5.6 IGBT 的应用注意事项及保护措施	43
2.6 功率开关器件的驱动电路	44
2.6.1 概述	44
2.6.2 功率开关器件对驱动电路的要求	44
2.6.3 非隔离（直接）驱动电路	46
2.6.4 集成驱动电路	47
2.6.5 隔离驱动电路	50
2.7 其他功率开关器件	51
2.7.1 GTO 及其驱动和应用	51
2.7.2 IGCT	53
2.7.3 MCT	53
2.7.4 SIT 与 SITH 的应用	54
2.7.5 功率模块与功率集成电路	54
2.7.6 宽禁带半导体电力电子器件	55
第 3 章 磁性材料和磁性元件	57
3.1 引言	57
3.1.1 高频开关变换器中的磁性元件	57
3.1.2 磁性材料与磁性元件的发展趋势	57
3.1.3 磁学中的常用单位及其换算	59
3.2 磁性材料的特性和参数	59

3.2.1 磁性材料的磁滞回线及主要参数	59	纹波电压分析	102
3.2.2 磁性材料的磁化曲线及基本特性	61	4.3.6 开关变换器的最大输出纹波电压分析	105
3.2.3 磁心损耗	63	4.3.7 Boost 变换器的电感电流分析	107
3.3 开关变换器中常用的磁性材料及磁心结构	64	4.3.8 Boost 变换器的主要特点和应用场合	109
3.3.1 开关变换器中常用磁性材料的分类及主要特点	64	4.4 Buck-Boost 变换器及三种常用非隔离开关变换器特性对比	110
3.3.2 磁心结构（外形）及其应用	66	4.4.1 Buck-Boost 变换器简介	110
3.4 开关变换器的常用磁性元件	68	4.4.2 三种开关变换器的能量传输过程与工作模式比较	110
3.4.1 电感元件	68	4.4.3 三种开关变换器的最小与最大临界电感	111
3.4.2 变压器	72	4.4.4 三种开关变换器的输出纹波电压与最小电感比较	111
3.4.3 脉冲电流互感器	76	4.4.5 三种开关变换器的电感电流比较	113
3.4.4 线圈的集肤效应和穿透深度	77		
第4章 非隔离开关变换器的分析与设计	79	第5章 隔离开关变换器的分析与设计	115
4.1 引言	79	5.1 正激变换器	115
4.1.1 非隔离开关变换器的分类	79	5.1.1 单管正激变换器的组成和工作原理	115
4.1.2 开关变换器中的电感和电容	79	5.1.2 CCM 单管正激变换器的工作过程和基本关系式	115
4.1.3 几点假设	80	5.1.3 DCM 单管正激变换器的工作特性和基本关系式	116
4.2 Buck 变换器	81	5.1.4 单管正激变换器的磁复位技术	117
4.2.1 Buck 变换器的组成和工作原理	81	5.1.5 单管正激变换器的极限参数及设计考虑	121
4.2.2 Buck 变换器的工作模式与等效电路	81	5.1.6 双管正激变换器的组成、工作原理和设计考虑	123
4.2.3 Buck 变换器的基本关系式	82	5.1.7 交错正激变换器的组成、工作原理和设计考虑	125
4.2.4 Buck 变换器的输出纹波电压分析	86	5.1.8 各类正激变换器的特点及应用注意事项	128
4.2.5 Buck 变换器的动态范围与最大输出纹波电压	88	5.2 反激变换器	129
4.2.6 Buck 变换器的最大电感电流分析	89	5.2.1 单管反激变换器的组成和工作原理	129
4.2.7 Buck 变换器的特点及应用注意事项	92	5.2.2 完全能量转换模式（DCM）时的工作过程和基本关系式	130
4.3 Boost 变换器	93	5.2.3 不完全能量转换模式（CCM）时的工作过程和基本关系式	131
4.3.1 Boost 变换器的组成和工作原理	93	5.2.4 单管反激变换器的工作模式及	
4.3.2 Boost 变换器工作于 CCM 和 DCM 时的主要关系式及其临界电感	93		
4.3.3 Boost 变换器的能量传输过程与工作模式	96		
4.3.4 Boost 变换器的动态范围及最小临界电感	100		
4.3.5 Boost 变换器三种工作模式的输出			

输出纹波电压分析	131	的组成原理与设计	166
5.2.5 单管反激变换器的设计考虑	133	6.4 有源钳位缓冲电路的组成原理与 设计	170
5.2.6 单管反激变换器的主要特点及 应用注意事项	136	6.4.1 有源钳位缓冲电路的组成和 工作原理	170
5.2.7 双管反激变换器的组成、工作 原理和设计考虑	137	6.4.2 有源钳位电路主要元器件参数的 设计考虑	173
5.2.8 交错反激变换器的组成、工作 原理和设计考虑	139	第7章 电压控制型开关变换器的稳定 性分析及补偿网络设计	175
5.2.9 各类反激变换器的主要优缺点及 应用注意事项	142	7.1 引言	175
5.3 推挽变换器	142	7.2 电压控制型开关变换器的组成原理及 应用	175
5.3.1 推挽变换器的组成和工作原理 ..	143	7.2.1 电压控制型开关变换器的组成和 工作原理	175
5.3.2 推挽变换器的工作过程和基本 关系式	143	7.2.2 电压控制型开关变换器的优 缺点	176
5.3.3 推挽变换器电感、电容的设计 考虑	145	7.2.3 电压控制模式常用芯片及其 应用	176
5.3.4 推挽变换器功率开关器件的电流、 电压最大承受值及设计考虑	146	7.3 电压控制型开关变换器闭环控制系统 的组成和稳定性判据	179
5.3.5 推挽变换器的主要优缺点及应用 注意事项	146	7.3.1 闭环控制系统的组成及要求	179
5.4 桥式变换器	147	7.3.2 闭环控制系统的稳定性及其 判据	180
5.4.1 半桥变换器的组成和工作原理 ..	148	7.4 电压控制型开关变换器系统的分析 ..	182
5.4.2 半桥变换器的工作特性和基本 关系式	148	7.4.1 概述	182
5.4.3 半桥变换器的常见问题及应对 策略	150	7.4.2 状态空间平均法及其分析步骤 ..	182
5.4.4 半桥变换器的极限参数及设计 考虑	153	7.4.3 电压控制型 Boost 变换器系统的 开环传递函数	184
5.4.5 半桥变换器的主要优缺点及其 应用注意事项	155	7.4.4 电压控制型 Boost 变换器的 Bode 图和稳定性分析	188
5.4.6 全桥变换器的组成原理及其 应用	155	7.5 电压控制型开关变换器系统闭环补偿 网络的设计	192
第6章 开关变换器的缓冲钳位电路 ..	159	7.5.1 开关变换器闭环补偿网络的作用 和一般设计步骤	192
6.1 引言	159	7.5.2 开关变换器闭环控制系统补偿 网络的设计实例	193
6.1.1 引入缓冲电路的必要性和作用 ..	159	第8章 电流控制型开关变换器及其 斜坡补偿技术	197
6.1.2 缓冲电路的类型	159	8.1 引言	197
6.2 RCD 缓冲电路的组成原理与设计	160	8.2 峰值电流控制型开关变换器的组成及 应用	198
6.2.1 RCD 缓冲电路的组成和分类	160	8.2.1 峰值电流控制型开关变换器的	
6.2.2 RCD 缓冲电路的设计	160		
6.3 LCD 缓冲电路的组成原理与设计	163		
6.3.1 Boost 变换器的 LCD 钳位电路的 组成原理与设计	164		
6.3.2 双管正激变换器的 LCD 钳位电路			

组成和工作原理	198	9.1.6 单级(隔离)功率因数校正 电路的组成和工作原理	229
8.2.2 常用电流控制型芯片	199	9.2 开关变换器的高频损耗问题与软开关 技术	232
8.2.3 电流控制型芯片应用实例	201	9.2.1 开关变换器的高频损耗问题及 应对策略	232
8.3 峰值电流控制型开关变换器的 稳定性	201	9.2.2 软开关变换器的类型及其组成 原理和特点	234
8.3.1 峰值电流控制 CCM 开关变换器 的稳定性	201	9.2.3 移相全桥型零电压开关 PWM 变换器	238
8.3.2 峰值电流控制 DCM 开关变换器 的稳定性	202	9.3 开关变换器的并联问题和均流技术 ...	246
8.4 峰值电流控制型开关变换器的优 缺点	202	9.3.1 概述	246
8.4.1 峰值电流控制型开关变换器的 特点	203	9.3.2 开关变换器模块并联供电系统 ...	247
8.4.2 峰值电流控制型开关变换器存在 的问题	204	9.3.3 无源均流法——串接均流 电阻法	248
8.5 峰值电流控制型开关变换器的斜坡 补偿技术	204	9.3.4 有源均流法之一——主从均 流法	249
8.5.1 斜坡补偿方式及原理	204	9.3.5 有源均流法之二——平均电流 自动均流法	250
8.5.2 常用斜坡补偿电路及工作原理 ...	206	9.3.6 有源均流法之三——最大电流 自动均流法	252
8.5.3 斜坡补偿电路参数的优化设计 ...	209	9.3.7 UC3907 最大电流自动均流控制 芯片的原理及应用	252
8.5.4 阻容斜坡补偿电路的设计实例 ...	211	9.4 开关变换器低压大电流问题与同步 整流技术	255
第9章 开关变换器的发展问题与新 技术	213	9.4.1 低压大电流开关变换器的需求 及二极管整流面临的问题	255
9.1 电能质量问题与功率因数校正技术 ...	213	9.4.2 同步整流技术及其原理	256
9.1.1 概述	213	9.4.3 同步整流管及其主要参数	257
9.1.2 功率因数校正及其分类	214	9.4.4 同步整流管的驱动方式	258
9.1.3 DCM 功率因数校正电路的组成 和工作原理	216	9.4.5 同步整流技术的损耗	264
9.1.4 临界导电模式功率因数校正 电路的组成和工作原理	221	参考文献	267
9.1.5 平均电流控制功率因数校正 电路的组成和工作原理	224		

第 1 章 绪 论

1.1 电能变换技术与开关变换器

电能变换技术就是将一种形式的电能变换为另一种形式电能的技术，如将交流电能变为直流电能、将直流电能变为交流电能或将一种电压和频率的交流电能变为另一种电压和频率的交流电能等。电能的转换是靠变换器来实现的，而组成变换器的核心就是开关器件。开关器件已从电子管发展到如今广泛应用的功率半导体器件。自从 1947 年第一只晶体管诞生至今，半导体器件的类型、性能指标等均发生了举世瞩目的变化，从不可控、半控到全控，从电流控制型到电压控制型，从第一代发展到第三代宽禁带半导体器件等。同时，功率半导体器件的工作状态经历了从不间断工作模式（开关器件一直工作在导通模式，对应的变换器称为线性变换器）到间断工作模式（包括相控模式和开关工作模式）的发展变化，使作为电能变换技术重要组成部分的变换器日新月异。

功率半导体器件工作在开关工作模式的变换器称为开关变换器，开关变换器是本书将要进行深入分析和论述的主要内容。

线性变换器（或称线性稳压电源）的基本组成原理框图如图 1.1.1 所示，其中主要包括采样电路、基准电压电路、误差放大电路及开关调整电路。线性变换器的基本原理是，通过采样电路取出输出电压的一部分作为反馈信号送到误差放大电路，再与由基准电压电路产生的高稳定度基准电压进行比较，经过误差放大电路后控制开关调整电路开关器件两端的电压，从而确保输出电压稳定；通过改变基准电压或反馈电压可实现对输出电压的调节。

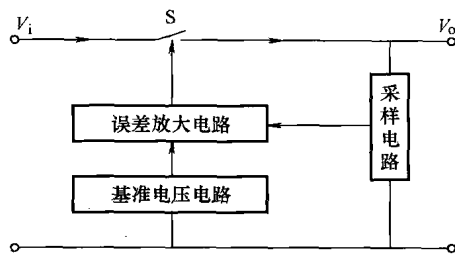


图 1.1.1 线性变换器的基本组成原理框图

可见，线性变换器是通过调整开关器件的管压降来实现输出电压的稳定或调节，其中的开关器件为线性连续控制，具有稳定性能好、输出电压纹波小、使用可靠等优点。但同时，首先，由于工频变压器（输入来自电网时）的使用，其存在体积大且笨重的缺点；其次，如果开关器件为晶体管，则晶体管工作在线性放大状态，需要通过调整晶体管的集-射极电压（ V_{ce} ）来保证输出电压的稳定，集电极与发射极之间的电压差随着输入电压的升高而增大，导致晶体管功率损耗随着增加，效率也随之降低，因此输入电源变化范围受到限制；再者，过高的功率损耗将引起变换器发热量增加，需要采用体积很大的散热器。这些缺点致使线性变换器无法满足电子设备发展的要求，从而促进了效率高、体积小、重量轻的开关变换器的迅速发展。

开关变换器通过调整开关器件的导通比来调节输出电压，因此对输入电源电压的适应性强、工作效率高（可达 70% ~ 98%）。同时，开关变换器采用高频变压器，使体积和重量大

大减小,特别是功率 MOSFET、肖特基二极管等新一代高频大功率半导体器件的出现及软开关技术的应用,使开关变换器的工作频率向高频化发展,其工作频率可高达几百千赫,甚至几兆赫,使得开关变换器不需要较大容量的滤波电容和电感,特别有助于实现轻、薄、小的开关电源。此外,开关变换器形式灵活多样,设计者可以发挥各种类型变换器的优势,设计出能满足各种不同应用场合的开关电源。因此,通过开关变换器进行电能形式的变换是电能变换技术的主流发展方向。

1.2 开关变换器的基本组成和原理

开关变换器的基本组成原理框图如图 1.2.1 所示,其中主要包括开关器件 S、输出滤波电路、基准电压电路、采样电路、误差放大电路、脉冲宽度调制电路(PWM 发生电路)和驱动电路等。其基本工作原理是:由基准电压电路产生的基准电压与来自采样电路的反馈电压经误差放大电路比较放大,放大后的输出电压信号和来自振荡器的锯齿波信号进行比较,产生相应的 PWM 波,再经过驱动电路后控制功率开关器件的开关状态,将输入直流电压变成脉冲电压,经过输出滤波电路后就得到所需要的直流电压值。开关变换器利用功率半导体器件作为开关器件,周期性控制开关通断,通过改变开关器件的导通比实现对输出电压的调节与稳定。

上述分析可见,由于开关变换器的开关器件工作在开关模式,因此,效率高、对输入电压和负载变化适应能力强。

从电能的输入和输出是否电气隔离又可将开关变换器划分为隔离开关变换器和非隔离开关变换器。隔离开关变换器主要包括单端正激和双正激变换器、单端反激和双反激变换器、推挽变换器、半桥和全桥变换器及各基本变换器组合而成的组合变换器等。非隔离的开关变换器主要包括 Buck 变换器(又称降压型变换器)、Boost 变换器(又称升压型变换器)、Buck-Boost(又称升降压型变换器)、Cuk、Sepic 和 Zeta 变换器等。

开关电源通常是由一个隔离的开关变换器(也称作一次电源)和若干隔离或非隔离开关变换器(也称作二次电源)级联构成,显然,开关变换器是开关电源的核心组成部分,也是电能变换技术的关键。

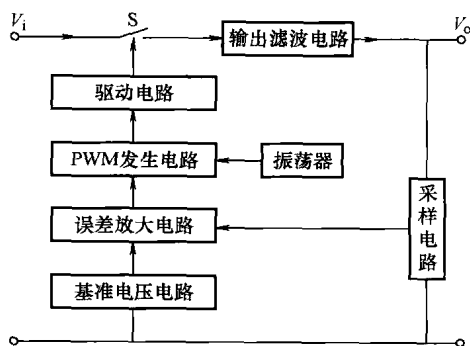


图 1.2.1 开关变换器的基本组成原理框图

1.3 开关变换器的调制技术及其特点

以开关变换器为核心的开关电源是 20 世纪 60 年代发展起来的一种稳压电源,其开关器件处于导通和截止两个工作状态,通过改变开关导通比可调节其输出电压。目前,能实现对开关导通比进行控制的调制方式主要有三种:脉冲宽度调制(PWM)技术、脉冲频率调制(PFM)技术及正弦波脉冲宽度调制(SPWM)技术,下面分别进行论述。

1.3.1 PWM 技术

PWM——脉冲宽度调制，是英文“Pulse Width Modulation”的缩写，简称脉宽调制。PWM 可通过模拟电路或数字电路来实现，也可利用数字信号处理器的数字输出来对模拟电路进行控制来实现，广泛应用于测量、通信、功率控制及功率变换等领域。

模拟电路实现 PWM 的方法是采用比较器完成的，将一参考电平信号与三角波或锯齿波信号进行比较，就可得到一组脉冲宽度受参考电平调制的 PWM 信号。PWM 信号的脉冲宽度（通常为高电平持续时间）与三角波或锯齿波信号的周期之比称为占空比，改变参考电平信号幅度即可改变占空比。采用数字化方案，即通过对模拟信号电平进行数字编码也可实现 PWM。

PWM 在开关变换器中被广泛采用，通过调节占空比可方便地改变其输出电压或使其输出电压稳定。PWM 脉冲的实现电路比较简单，但由于 PWM 脉冲的输出频率是恒定的，如果开关变换器工作频率较高，则在轻载或处于待机状态时，开关损耗将极为可观，造成大量的能耗。

1.3.2 PFM 技术与混合控制

PFM——脉冲频率调制，是英文“Pulse Frequency Modulation”的缩写，其输出脉冲频率是可变的，而 PWM 脉冲的频率则是恒定的。PFM 脉冲对应两种情况：一种是脉冲的宽度（高电平持续时间）固定，如果将 PFM 脉冲用于控制开关变换器，则通常指开关导通时间固定；另一种是脉冲的宽度不固定，而是脉冲低电平持续时间固定，如果将 PFM 脉冲用于控制开关变换器，则通常指开关关断时间固定。

无论开关变换器采用哪一种 PFM 方式，均是通过改变开关工作频率来改变占空比，从而实现输出电压调节或稳定。PFM 的特点是占空比可在较宽的范围内变化，输出电压的可调范围也比 PWM 方式大。但与固定频率的 PWM 方式相比，为确保滤波电路在较宽的范围内正常工作，滤波器元件的容量和体积较大，而且 PFM 的控制、系统的稳定性、主电路参数的设计和选择等所面临的问题也较为突出；同时，实现 PFM 的电路相对要复杂得多，因此，PFM 的应用受到限制。

然而，正是由于 PFM 脉冲频率可变，所以在开关变换器轻载或待机时，可使其工作频率足够低，从而大大降低轻载或待机损耗。随着负载电流的增加，逐渐提高开关频率，但如果在重载时，工作频率太高将会引起开关损耗急剧增加。为了解决上述问题，最佳的选择是采用 PWM/PFM 混合调制，即在空载或待机时，使开关变换器工作于 PFM 方式；而在负载电流达到某一设定值时，使开关变换器工作于 PWM 方式，这样就可以充分发挥两种调制方式的优点。事实上，目前大多数公司生产的开关变换器控制芯片，均具有这种混合调制功能。

1.3.3 SPWM 技术

如果开关变换器的输出是正弦波电压，则要求其开关器件导通比按照正弦规律变化，从而提出了正弦波脉冲宽度调制（SPWM）技术。SPWM 是采用正弦调制波对脉冲宽度进行调制，得到按正弦规律变化的等效 SPWM 波形，再控制开关变换器中开关器件的通断，使其

输出脉冲电压的面积与所希望输出的正弦波在相应区间内的面积相等,从而得到满足预期要求的正弦波电压。通过改变调制波的频率和幅值,可调节开关变换器输出电压的频率和幅值。实现 SPWM 的方案有下面几种。

1. 等面积计算法

该方案实际上就是用等幅而不等宽的矩形脉冲序列代替正弦波,根据面积相等的原则计算各脉冲的宽度和间隔,并把这些数据存于微机中,通过查表的方式生成 PWM 信号控制开关器件的通断,以达到预期的目的。由于此方法是以 SPWM 控制的基本原理为出发点,可以准确地计算出各开关器件的通断时刻,其所得的波形很接近正弦波,但其存在计算繁琐,数据占用内存大,不能实时控制的缺点。

2. 硬件调制法

硬件调制法是为解决等面积法计算繁琐的缺点而提出的,其原理就是把所希望的波形作为调制信号,把接受调制的信号作为载波,通过对载波的调制得到所期望的 PWM 波形。

(1) 以正弦波作为调制信号

通常采用三角波作为载波,当调制信号波为正弦波时,所得到的就是 SPWM 波形。其实现方法简单,可以用模拟电路构成三角波载波和正弦调制波发生电路,用比较器来确定它们的交点,在交点时刻对开关器件的通断进行控制,就可以生成 SPWM 波。但是,这种模拟电路结构复杂,难以实现精确的控制。

(2) 以梯形波作为调制信号

以正弦波作为调制信号的 SPWM 方式,直流电压的利用率低,为了提高直流电压利用率,提出了一种新的方法——梯形波与三角波比较法。该方法是采用梯形波作为调制信号,三角波为载波,且使两波幅值相等,以两波的交点时刻控制开关器件的通断实现近似 SPWM 控制。

由于当梯形波幅值和三角波幅值相等时,其所含的基波分量幅值已超过了三角波幅值,从而可以有效地提高直流电压利用率。但由于梯形波本身含有低次谐波,所以输出波形中含有五次、七次等低次谐波。

3. 软件生成法

由于微机技术的发展使得用软件生成 SPWM 波形变得比较容易,因此,软件生成法也就应运而生。软件生成法其实就是用软件来实现调制的方法,其有两种基本算法,即自然采样法和规则采样法。

(1) 自然采样法

以正弦波为调制波,等腰三角波为载波进行比较,在两个波形的自然交点时刻控制开关器件的通断,这就是自然采样法。其优点是滤波后所得 SPWM 波形最接近正弦波,但由于三角波与正弦波交点有任意性,脉冲中心在一个周期内不等距,从而使得脉宽表达式是一个超越方程,计算繁琐,难以实时控制。

(2) 规则采样法

规则采样法是一种应用较广的工程实用方法,一般采用等腰三角波作为载波。其原理是取三角波两个相邻峰值之间为一个采样周期,在三角波波谷(左波峰与波谷)时刻对正弦波进行采样,并以此采样值为纵坐标值作水平线,该水平线与本周期的三角波相交于两点(一前一后),并规定前交点为开关器件导通时刻,后交点为关断时刻,则两交点之间的间

隔即为开关管导通脉冲宽度，依此方法得到的系列脉冲和自然采样法得到的脉冲宽度非常接近，从而实现 SPWM。根据该方法，由水平线与三角波确定的两交点，在一个载波周期（即采样周期）内的位置是对称的，这种方法称为对称规则采样。

规则采样法是对自然采样法的改进，其主要优点就是计算简单，便于在线实时运算。

以上两种方法均只适用于同步调制方式中。

1.4 开关变换器系统的性能指标和功能要求

1.4.1 电气性能指标

通常开关变换器或电源有数十项指标，但最常提及的指标有输出电压精度、电源调整率、负载调整率、输出纹波及噪声、保护性能及效率等。需要指出的是，各项性能指标以满足用户要求为宜，不必过分追求高指标而无形地增大电源的体积、重量和成本。下面分几方面对部分电气性能指标加以说明。

1. 输入指标

1) 输入电压：输入电源电压相数和频率、额定输入电压、输入电压的变化范围。例如当输入为市电时，电源的额定电压因各国或地区不同而异，我国为 220V，输入电压范围比较宽，一般为 176 ~ 264V；交流输入频率为 50Hz 或 60Hz，频率变化范围通常为 47 ~ 63Hz。

2) 额定输入电流：开关变换器的额定输入电流是指输入电压、输出电压和输出电流为额定值时的输入电流。

3) 最大输入电流：开关变换器的输入电压为下限值，而输出电压和电流为上限值时对应的输入电流。

4) 浪涌电流：开关变换器以规定的时间间隔对输入电压进行通断操作时，输入电流达到稳定状态之前流经的最大瞬时电流。浪涌电流通常是指输入电源接通瞬间，可能流经开关变换器的最大电流。

2. 输出指标

开关变换器的输出指标，通常包括额定输出电压和电流。如果输出为正弦波，输出指标还包括输出频率和失真度；如果输出为直流，输出指标还包括输出纹波电压。

1) 最大纹波电压：在额定输出电压和负载电流下，输出纹波电压的（包括噪声）绝对值的大小，通常以峰-峰值或有效值表示。

2) 纹波系数（%）：在额定负载电流下，输出纹波电压的有效值与输出直流电压之比。

需特别说明的是，噪声不同于纹波：纹波是出现在输出端子间的一种与输入频率和开关频率同步的成分，用峰-峰（Peak to Peak）值表示，一般在输出电压的 1% 以下；噪声是出现在输出端子间的纹波以外的一种高频成分，也用峰-峰值表示，一般在输出电压的 1% 左右。纹波噪声是两者的合成，用峰-峰值表示，一般在输出电压的 2% 以下。

3) 失真度：失真度是指输出波形产生波形畸变，主要是针对输出为正弦波电源。

3. 稳定性指标

(1) 输入电压变化对输出电压影响的指标

1) 绝对稳压系数: 表示负载不变时, 开关变换器输出直流电压变化量 ΔV_o 与输入电压变化量 ΔV_i 之比, 即 $K = \Delta V_o / \Delta V_i$ 。

2) 输入电压调整率——源效应: 当负载为额定值, 输入电压相对额定输入电压在一规定范围内变化时, 开关变换器输出电压的相对变化量, 有时也以绝对值表示。

3) 电压稳定度: 负载电流保持为额定范围内的任何值, 输入电压在规定的范围内变化所引起的输出电压相对变化量 $\Delta V_o / V_o$ (百分数), 称为稳压器的电压稳定度。

(2) 负载对输出电压影响的指标

1) 负载调整率 (也称电流调整率): 在额定输入电压下, 负载电流从零变化到最大时, 输出电压的最大相对变化量, 常用百分数表示, 有时也用绝对变化量表示。

2) 输出电阻 (也称等效内阻或内阻): 在额定输入电压时, 由于负载电流变化 ΔI_o 引起输出电压变化 ΔV_o , 则输出电阻为

$$R_o = |\Delta V_o / \Delta I_o|$$

4. 转换效率

开关变换器的转换效率是指其输出功率和输入功率的比值, 即

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

转换效率的大小直接影响开关变换器所需散热装置的大小, 从而引起体积、重量、温度等的不同。因此, 在研制开关变换器时, 应尽可能提高其转换效率。

5. 保护指标

1) 过电流保护: 是一种电源负载保护功能, 以避免发生包括输出端子上的短路在内的过负载输出电流对电源和负载的损坏。过电流的给定值一般是额定电流的 110% ~ 130%。

2) 过电压保护: 是一种对端子间过大电压进行负载保护的功能。一般规定为输出电压的 130% ~ 150%。

3) 输出欠电压保护: 当输出电压在标准值以下时, 检测输出电压下降或为保护负载及防止误操作而关断开关变换器并发出报警信号。通常为输出电压的 80% ~ 30% 左右。

4) 过热保护: 在电源内部发生异常或因使用不当而使电源温升超标时停止电源的工作并发出报警信号。

6. 温漂和时漂指标

(1) 温度对输出电压影响的指标——温度漂移 (简称温漂)

温度漂移: 由于环境温度的变化影响元器件的参数变化, 从而引起开关变换器输出电压变化。常用温度系数表示温度漂移的大小。

1) 绝对温度系数: 温度变化 1℃ 引起输出电压值的变化量 ΔV_{ot} , 单位是 V/℃ 或 mV/℃。

2) 相对温度系数: 温度变化 1℃ 引起输出电压相对变化 $\Delta V_{ot} / V_o$ 。

(2) 时间对输出电压影响的指标——时漂

在输入电压、负载电流和环境温度保持一定的情况下, 开关变换器元器件参数的稳定性也会造成输出电压的变化。慢变化叫漂移, 快变化叫噪声, 介于两者之间叫起伏。表示漂移

的方法有两种。

- 1) 在指定的时间内输出电压值的变化 ΔV_{ot} 。
- 2) 在指定的时间内输出电压的相对变化 $\Delta V_{ot}/V_o$ 。

考察漂移的时间可以定为 1min、10min、1h、8h 或更长。只在精度较高的稳压器中，才有温度系数和温漂两项指标。

7. 动态响应指标

(1) 响应时间

响应时间是指负载电流或输入电压在给定的变化范围内突然变化时，开关变换器的输出电压从开始变化到达到新的稳定值所需的调整时间。

(2) 超调和跌落

超调是指负载电流突然减小规定值时，开关变换器输出电压的最大增加量；跌落是指负载电流突然增大规定值时，开关变换器输出电压的最大减小量。

除了上述主要电气性能指标要求外，还有绝缘性能指标等要求，在此不再一一介绍。

1.4.2 电磁兼容性指标

开关变换器是电气电子设备供电系统的核心，由于其工作在开关状态，且频率高、频带宽和功率大，因此其本身就是一个强大的电磁干扰（EMI）源，严重时会导致周围的电子设备功能紊乱，使系统传输数据错误、出现异常的停机和报警等，将造成不可弥补的后果；同时，开关变换器也置身于周围电磁环境中，对周围的电磁干扰也很敏感（EMS），如果没有很好的抗电磁干扰能力，它也不可能正常工作。因此，营造一种良好的电磁兼容（EMC）环境，是确保电子设备正常工作的前提，且也成为电子产品设计者的重要考虑因素。

不仅如此，国内外已有多种法规和标准对电子产品的电磁干扰限值和灵敏度作出规定和限制。欧盟有关 EMC 的委员会于 1992 年制定了相关法令，1996 年开始生效，法令规定不符合 EMC 标准的产品不得进入市场，同时将 EMC 认证和安规认证作为产品认证的首要条件。我国原信息产业部也多次召开电磁兼容标准论证会，并作出规定：2001 年 1 月 1 日以后进入市场的产品必须有 EMC 标志。可见，电磁兼容（EMC）认证已是产品顺利进入市场并走出国门最基本的要求。

电磁兼容是研究在有限空间、时间以及频谱资源条件下，各种电气、电子设备可以共存，并不引起性能降低的专门学科。电磁兼容其实质含义具有两方面的内容：一方面，设备或系统产生的电磁骚扰，不应对外部设备造成不能承受的干扰，也不应对外部环境造成不能承受的污染；另一方面，设备或系统对来自周围环境中的电磁干扰应具有足够的抗御能力。要做到这些，相当困难，设计者必须通过学习和大量的实践，深刻认识电磁兼容的真正含义和产生干扰的途径，采取有效措施进行 EMC 设计。例如，加电网滤波器，采取无源补偿方案，以有效地抑制传导干扰；加各种屏蔽措施，以抑制辐射干扰；加 RC 吸收网络于电路的适当部位以吸收开关尖峰；利用各种软开关技术，保证开关器件在零电压下导通、零电流下关断，以减小过高的电流、电压梯度所带来的严重电磁干扰；合理设计印制电路板，合理的地线布局等都会减小电磁干扰。总之，电磁兼容技术发展很快，用户对电磁兼容的要求也会越来越高，值得电源供应商倍加注意。

描述开关变换器电磁兼容性指标的指标主要包括：①磁场敏感度；②静电放电敏感度；

③辐射敏感度；④传导敏感度；⑤传导干扰；⑥辐射干扰。

1.4.3 保护功能要求

开关变换器或开关电源可能因为输入电压的波动、外接负载的故障及自身的异常等而损坏或影响其性能和工作的可靠性，同时也可能因为开关变换器的工作不正常，而导致负载或负载设备的损坏等，因此，要使开关变换器系统及负载安全可靠工作，就必须具备齐全的保护功能。为此，针对不同的保护需要，研究人员提出了多种类型的保护方案和保护电路。

开关器件是开关变换器的核心部件，价格较贵，因此，保护措施首先要确保开关器件安全、可靠工作。另外，开关变换器或开关电源的负载中一般都含有大量的集成化程度很高的器件，这些器件一般耐受电、热、冲击能力都较差，因而，开关变换器的保护应兼顾本身和负载的安全。目前，保护的种类很多，除了前面提到的过电流保护、过电压保护、欠电压保护及过热保护外，还有极性保护、程序保护、过功耗保护等。由于开关变换器或开关电源的种类很多，用途各异，所以，对保护的要求也各有侧重，保护的设置应按具体要求而定。开关变换器或开关电源中加了保护电路后，势必增加元器件，反过来又会影响系统的可靠性，为此要求保护电路本身的可靠性一定要高，以提高整个系统的可靠性，进而提高开关变换器本身的平均故障间隔时间（MTBF）。这就要求保护的逻辑严密，电路简单，元器件最少。除此而外，还要考虑所保护电路本身出现故障的维修度，确保电源的正常工作和高可靠性。

其他还有安全性能等要求。

第2章 功率半导体器件及其驱动电路

2.1 引言

2.1.1 功率半导体器件的发展历程

功率半导体器件是电力电子技术或电能变换技术的基础，每一种新型器件的诞生都将会促进电力电子技术产生革命性的飞跃发展。

功率器件的发展可追溯到1904年出现的电子管（Vacuum tube），它能在真空中对电子流进行控制，并应用于通信和无线电等领域。后来出现了水银整流器（Mercury Rectifier），其性能和晶闸管（Thyristor）很相似。在20世纪30年代到50年代，是水银整流器发展迅速并大量应用的时期，被广泛用于电化学工业、轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电等。

1947年，第一只晶体管的诞生为电子电路的集成化和数字化奠定了重要的物理基础，开创了电子技术发展的一个崭新时代——固体电子技术时代。随着电子工业的飞速发展，特别是自动化技术的不断进步，人们对器件耐压及电流容量提出了越来越高的要求，促使人们对半导体材料性质及器件物理作进一步深入的研究，催生了各类新型大功率器件的出现。1957年，第一只晶闸管的问世标志着电力电子技术的诞生，其催化剂正是晶体管的发明以及大功率晶闸管和GTO（门极关断）晶闸管的出现。

自从20世纪50年代由美国通用公司发明的硅晶闸管问世以后，诸多研究工作者为研制高性能功率器件做出了不懈的努力，并已取得了令世人瞩目的成就。60年代，晶闸管的电压电流容量（即器件的功率）不断提高，由普通晶闸管很快就衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管（RCT）、双向晶闸管（TRIAC）以及不对称晶闸管（ASCR）等半控型器件，形成一个可控硅整流器（SCR）家族，其优点是功率容量特别大，缺点是开关速度低、关断不可控，且因强制换流关断使控制电路非常复杂，限制了它的应用。60年代后期，门极关断（GTO）晶闸管实现了门极可关断功能，并使斩波工作频率扩展到1kHz以上。

20世纪70年代初期出现了巨型晶体管（Giant Transistor, GTR），也称为电力晶体管或大功率晶体管，GTO和GTR两者都是自关断器件，开关速度高于SCR，而控制电路却大为简化。但是，GTO的开关速度还是较低，而GTR存在二次击穿和不易并联问题，且其均存在驱动电流大、功耗损失大的问题。70年代末又出现了功率场效应晶体管（Power MOSFET，也称功率MOSFET）及静电感应晶体管（SIT）等，具有开关速度高、输入阻抗高、控制功率小、驱动电路简单等特点，其工作频率也极大地提高。从此，各种高频率的全控型器件不断问世，并得到迅速发展。

20世纪80年代后期开始开展复合型器件的研究，其中的典型代表即是绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）。IGBT是金属氧化物半导体场效应晶体管