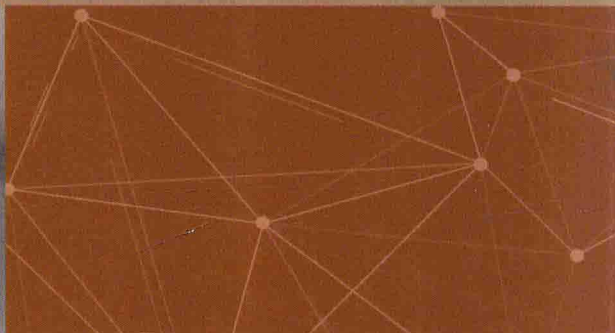
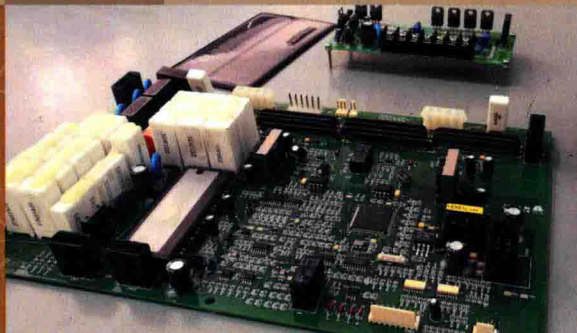


江苏高校品牌专业建设工程资助项目



普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程专业系列教材



光伏电源设计 与创新

李天福 张慧国 编著
钱 斌 马玉龙



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程系列教材

光伏电源设计与创新

李天福 张慧国 编著
钱 斌 马玉龙

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以光伏电源能量变换设计与创新实践为主要内容,包括稳压电源和逆变电源基础、光伏变流与控制、光伏发电系统与应用三部分,给出了题目、基本原理、关键设计、设计注意事项和练习内容。本书共5章,第1章介绍电力电子基础知识,第2章介绍开发工具和测试仪器仪表,第3章为稳压电源和逆变电源的基础性设计题目,第4章为光伏特性、储电、光伏能量控制和变换技术相关的设计题目,第5章为光伏发电系统以及光伏发电应用的设计题目。

本书可作为新能源科学与工程专业学生“新能源发电与控制”的课程设计、创新训练的实践指导书,也可作为电子设计爱好者、从事光伏研究的工程技术人员实践入门的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光伏电源设计与创新 / 李天福等编著. —北京: 科学出版社, 2019.5
普通高等教育“十三五”规划教材·新能源科学与工程专业系列教材
ISBN 978-7-03-061023-2

I. ①光… II. ①李… III. ①太阳能光伏发电-高等学校-教材
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 069043 号

责任编辑: 余 江 张丽花 高慧元/责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 张 伟/封面设计: 迷底书装

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第一版 开本: B5(720×1000)

2019年5月第一次印刷 印张: 10

字数: 200 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

“新能源发电与控制”的理论学习和实践训练密不可分，这也是新能源科学与工程专业课程的特点之一。从常熟理工学院前几年“新能源发电与控制”理论课和实践课的教学情况来看，从理论学习、实验实训、模仿改造到设计开发，学生的实际操作和创新能力逐步提升，这是一条适合学生能力培养的良好路径。但从实践过程中发现，有诸多不利因素，如涉及电路原理、电力电子技术、光伏电池组件等专业基础课知识较多，实验设备、器材条件及实践和实训时间的制约等，使学生的实践能力培养效果不理想。随着高校新工科教育实践和工程教育认证的要求不断提高，教学目标从解决技术问题逐步要求考虑解决产品问题，而产品问题涉及因素更多，如可靠性、测试安装维护、成本和环境影响等，需要学生拥有多方面的知识和能力。因此，需要编写相关光伏电源设计的指导书，本书就是在此背景下尝试编写的。

本书是在前期的课程实验实训的基础上，结合新能源科学与工程专业特点编写完成，包括电源设计培训、发电与控制课程设计和毕业设计的题目。全书共 5 章：第 1 章为电力电子基础知识，主要介绍稳压电路和逆变电路的工作原理、分类、测试指标；第 2 章为开发与测试工具，主要介绍测试仪器仪表，以及仿真软件、电子电路的计算机辅助设计软件、单片机系统开发软件的流程；第 3 章为稳压电源和逆变电源基础，主要集中了一些通用电源基础题目，包括基本的降压、升压、逆变、信号控制电路等；第 4 章为光伏变流与控制，主要是光伏特性、储电、光伏能量控制和变换技术相关的设计题目；第 5 章为光伏发电系统与应用，主要是光伏发电系统设计和光伏电能作为电源的一些应用系统设计题目。

虽然题目的分类、内容和要求比较粗略，但编者给出多种设计方案，且尽量使用学生已学课程知识和常用元器件。设计方案为该题目的总体设计或关键设计内容，需要学生进一步完善元器件的选型设计、软硬件详细设计、原理图和印刷电路板图的绘制等。除了题目的基本原理和关键设计外，本书还介绍了一些设计的注意事项，提供了一些练习和发挥题目，提出了该题目用相似器件替代、相关功能电路替代的设计要求，以及需要改进的问题等，有利于学生扩展类似的设计。通过示例方案、练习与发挥题目，希望能起到抛砖引玉的作用，使读者缩小资料查找范围，达到快速引导的目的。读者可以通过对比各方案的特点，完善细节、改进设计、发挥想象力，实现创新设计。

在章节内容安排上，力求理论知识简洁，设计知识实用，重点突出；在层次安排上，由简入繁，难度逐步深化，要求逐渐提高。光伏电源设计涉及电子技术、单片机技术、光伏发电与控制等多门课程，具有课程交叉的特点，须综合考虑多方面要求。本书对这些课程的基础理论知识不作阐述，仅讲述电源的基本理论知识和开发测试工具。设计题目要求适当简化，这样可能会使题目指标不严格、设计不完整，但不影响主要设计目标。

本书第1章、第2章由常熟理工学院的张慧国、钱斌、马玉龙编写，其余章节由李天福编写，江学范教授负责审稿。多届新能源科学与工程专业的学生叶建民、徐潇宇、李双双、梁熙、廖佳明、闻来仪、王韞清、侍玉超等对本书的内容提出了修改意见，湖北众友科技实业股份有限公司的技术人员提供了4.3节、4.4节的相关资料。

在本书的编写过程中，参阅了一些文献和网络资料，在此对这些文献资料的作者表示衷心的感谢。常熟理工学院的领导和教师对本书的写作提供了帮助，科学出版社的编辑对本书的出版做了大量的工作，编者的家人提供了大量的无私帮助，在此一并表示感谢。

限于编者水平，疏漏之处在所难免，恳请读者不吝指正。

编者

2018年11月

目 录

第 1 章 电力电子基础知识	1
1.1 直流稳压电路	1
1.1.1 稳压电路	1
1.1.2 常见开关型稳压电路	3
1.2 逆变电源	9
1.2.1 逆变电源分类	9
1.2.2 逆变电路的构成	10
1.2.3 逆变电路的控制	10
1.3 电源主要要求	10
1.4 太阳能电池及其发电系统	13
第 2 章 开发与测试工具	15
2.1 测试仪器仪表	15
2.2 电路 CAD 软件	16
2.3 仿真软件	19
2.4 单片机系统开发软件	20
第 3 章 稳压电源和逆变电源基础	22
3.1 可调式正负输出稳压电源	22
3.1.1 原理与方案	23
3.1.2 关键设计	23
3.1.3 设计注意事项	25
3.1.4 练习与发挥	26
3.2 可调降压式开关电源模块	27
3.2.1 原理与方案	27
3.2.2 关键设计	27
3.2.3 设计注意事项	29
3.2.4 练习与发挥	29
3.3 可调升压式开关电源模块	30
3.3.1 原理与方案	30
3.3.2 设计方案一	30

3.3.3	设计方案二	31
3.3.4	TL494 使用注意事项	33
3.3.5	练习与发挥	34
3.4	特殊要求的直流电源模块	34
3.4.1	原理与方案	34
3.4.2	无线电源设计	35
3.4.3	干电池升压电路	35
3.4.4	练习与发挥	37
3.5	PWM 信号输出可调模块	37
3.5.1	原理与方案	38
3.5.2	分立电子元件组成的 PWM 设计	38
3.5.3	主芯片采用 SG3525 芯片可调脉冲输出设计	40
3.5.4	主芯片采用 51 单片机可调脉冲输出设计	40
3.5.5	练习与发挥	42
3.6	声控光控延时开关模块	42
3.6.1	原理与方案	43
3.6.2	晶闸管的使用	44
3.6.3	光电耦合器的使用	46
3.6.4	继电器的使用	47
3.6.5	练习与发挥	47
3.7	离网方波逆变器	48
3.7.1	原理与方案	48
3.7.2	关键设计	48
3.7.3	基准电源	49
3.7.4	过压保护	52
3.7.5	练习与发挥	54
3.8	离网正弦波逆变器	54
3.8.1	原理与方案	54
3.8.2	关键设计	55
3.8.3	电源滤波器	57
3.8.4	练习与发挥	59
第 4 章	光伏变流与控制	60
4.1	光伏组件的升降压输出电路	60
4.1.1	原理与方案	60

4.1.2	LM2577 设计方案	61
4.1.3	XL6019 设计方案	63
4.1.4	练习与发挥	64
4.2	光伏控制器设计	64
4.2.1	原理与方案	64
4.2.2	关键设计	65
4.2.3	电压比较器	67
4.2.4	练习与发挥	68
4.3	恒流恒压蓄电池充电电路设计	68
4.3.1	原理与方案	68
4.3.2	恒流电路	70
4.3.3	练习与发挥	70
4.4	太阳能电池外特性研究	70
4.4.1	原理与方案	71
4.4.2	测试步骤	72
4.4.3	实验注意事项	73
4.4.4	练习与发挥	73
4.5	光伏输入的反激电源设计	73
4.5.1	原理与方案	74
4.5.2	关键设计	74
4.5.3	电路的干扰问题	77
4.5.4	练习与发挥	78
4.6	太阳能跟踪控制电路设计	78
4.6.1	原理与方案	78
4.6.2	关键设计	80
4.6.3	传感器	82
4.6.4	练习与发挥	83
4.7	太阳能最大功率点跟踪电路	83
4.7.1	原理与方案	83
4.7.2	CN3722 设计方案	84
4.7.3	基于单片机的方案	86
4.7.4	练习与发挥	89
4.8	光伏汇流数据采集模块设计	89
4.8.1	原理与方案	89

4.8.2	关键设计	90
4.8.3	霍尔传感器	92
4.8.4	练习与发挥	95
4.9	小型光伏离网逆变电路设计	95
4.9.1	原理与方案	95
4.9.2	SPWM 技术	102
4.9.3	练习与发挥	105
4.10	小型并网逆变器的设计	105
4.10.1	原理与方案	105
4.10.2	关键设计	107
4.10.3	并网问题	113
4.10.4	练习与发挥	116
第 5 章	光伏发电系统与应用	117
5.1	太阳能频闪灯	117
5.1.1	原理与方案	117
5.1.2	使用双稳态电路设计方案	117
5.1.3	使用定时或时基电路方案	117
5.1.4	使用单片机控制的方案	118
5.1.5	练习与发挥	121
5.2	太阳能红外接近报警器	121
5.2.1	原理与方案	122
5.2.2	关键设计	123
5.2.3	入侵探测器	124
5.2.4	练习与发挥	126
5.3	太阳能移动电源充电器电路	127
5.3.1	原理与方案	127
5.3.2	关键设计	127
5.3.3	移动电源的电路方案分析	129
5.3.4	练习与发挥	130
5.4	太阳能草坪灯	131
5.4.1	原理与方案	131
5.4.2	分立元件构成的升压电路设计	132
5.4.3	太阳能草坪灯集成电路为核心的设计	133
5.4.4	练习与发挥	134

5.5 太阳能LED路灯控制器的设计	134
5.5.1 原理与方案	135
5.5.2 采用单片机电路的太阳能路灯控制器设计	136
5.5.3 太阳能路灯系统注意事项	139
5.5.4 练习与发挥	141
5.6 离网光伏发电系统设计	141
5.6.1 主要流程与步骤	142
5.6.2 离网系统处理的内容	142
5.6.3 注意事项	143
5.6.4 练习与发挥	143
5.7 并网光伏发电系统设计	144
5.7.1 关键设计	144
5.7.2 练习与发挥	144
5.8 其他光伏设计题目	145
参考文献	147

第 1 章 电力电子基础知识

1.1 直流稳压电路

稳定的直流电在电子系统和控制系统中使用非常广泛，而从光伏输出或交流电输出变为稳定的直流电，需要中间的能量转换环节，这就是能量变换电路(变流电路)，这种能量变换电路也称稳压电路。稳压直流电能的获得过程：如果输入是交流电，先把交流电用整流电路变成波动的直流电，此时与光伏的电压特性一致，将整流电压或光伏电压通过稳压电路转变为合适的电压，最后用滤波电路滤除脉动直流电中的波动成分，输出稳定直流电。

整流电路，通常由二极管整流电路完成。滤波电路，通常由电容滤波、电感滤波、LC 滤波、RC 滤波电路完成。

1.1.1 稳压电路

稳压电路成为电能变换电路的关键环节，根据工作原理不同分类，可以分为并联型稳压电路、串联型稳压电路、开关型稳压电路三类。

1) 并联型稳压电路

用一个稳压器件和限流电阻串联，则稳压器件两端产生稳定的直流电压，形成最简单的稳压电路，如图 1-1 所示^①。图中 R 为限流电阻，电路的输出电压 U_o 等

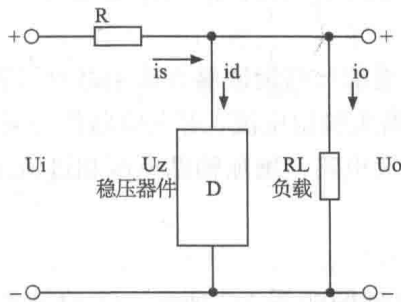


图 1-1 并联型稳压电路原理图

^① 本书图中器件标注使用正体，公式中变量使用斜体。

于稳压器件的稳定电压值 U_Z 。这个电路的输出电流很小，输出电流的大小主要由稳压器件 D 的电流吞吐能力决定， $i_o = i_s - i_d$ 。这类稳压器件有：稳压二极管、LM136/236/336、LM385、AD589 等。

2) 串联型稳压电路

串联型稳压电路原理图如图 1-2 所示，电路有负反馈作用。

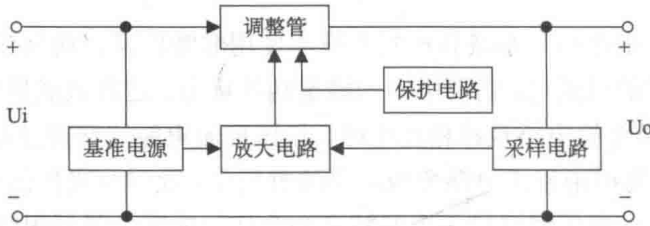


图 1-2 串联型稳压电路原理图

调整管：调整输入和输出之间的电压，要求较小的输入电流可以控制输出较大的电流，调整管的输入电阻要大。

放大电路：信号放大作用，电路常用放大管共射连接，要求有较高的电压放大倍数。

基准电源：提供基准电压，基准电源要具有低噪声、低温漂的特点。

采样电路：对输出电压进行采样，采样电路通常由分压电阻组成。

串联型稳压电路的基本工作原理：从采样电路中检测出输出电压的变动，与基准电压比较，经放大电路放大后加到调整管上，使调整管两端的电压随着变化。如果输出电压下降，就使调整管管压降也降低，于是输出电压被提升；如果输出电压上升，就使调整管管压降也上升，于是输出电压被压低，结果就使输出电压基本不变。

在这个电路的基础上增加一些辅助器件或电路可以发展出很多变形电路，例如，用复合管作为调整管增大输出电流，用电位器作为采样电阻使输出电压可调，用运算放大器作为比较放大电路、增加辅助电源和过流保护电路等。

3) 开关型稳压电路

开关型稳压电路的原理图如图 1-3 所示。它的基本工作原理：从采样电路中检测出采样电压经比较放大后去控制一个开关调整管（或称开关管）实现电压调节。

U_i 是有波动的直流输入电源，当输出电压 U_o 发生变化时，采样电路将输出

电压变化量的一部分送到比较放大电路，与基准电压进行比较并将二者的差值放大后送至脉宽调制电路，使脉冲波形的占空比发生变化。此脉冲信号作为开关管的输入信号，使开关管导通和截止时间的比例也发生变化，从而使滤波后输出电压的平均值基本保持不变。

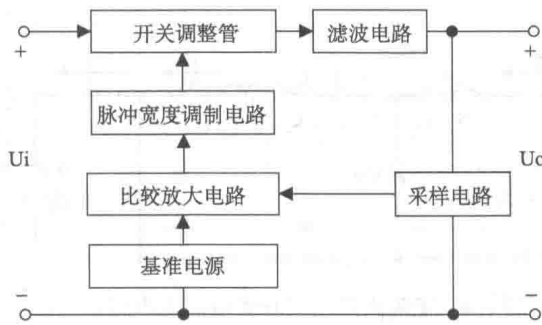


图 1-3 开关型稳压电路原理图

如果是交流输入，需要将交流电压经整流电路及滤波电路整流滤波后，变成含有一定脉动成分的直流电压，经开关型稳压电路，最后再通滤波电路变为所需要的直流电压。

开关型稳压电源，其调整管工作在开关状态，本身功耗很小，所以效率高、体积小等优点，但电路比较复杂。

脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)电路用来调节开关管的开关时间比例，达到稳定输出电压目的，是开关型稳压电路的核心。如果将采样电路、比较放大电路、振荡器、脉宽调制及基准电源等电路，甚至开关管集成一体，可以制成各种开关型集成稳压电路。

开关型集成稳压电路，已有大量产品问世，品种很多，结构也各不相同。这种电路外围元件少，稳压精度高，工作可靠，一般不需要调试，易于实现由集成化稳压电路构成的稳压模块。与开关型集成稳压电路类似，同样可以制作串联型稳压电路。

1.1.2 常见开关型稳压电路

开关型稳压电路的结构有多种不同的形式，按照输入和输出之间是否使用隔离变压器，分为隔离开关型稳压电路和无隔离开关型稳压电路。

无隔离开关型稳压电路按照输出电压不同又分为降压型、升压型、升降压型。隔离开关型稳压电路又可分为单端正激型、单端反激型、半桥型、全桥型、推挽型电路 5 种。

稳压电路通常用脉冲宽度调制信号控制，用 D 表示 PWM 信号的占空比。

1) 无隔离降压型

无隔离降压型开关电源电路(或称降压斩波器, Buck 电路), 其主电路原理图如图 1-4 所示。

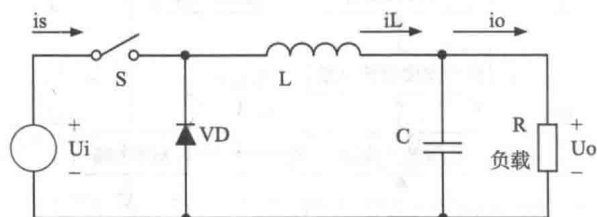


图 1-4 无隔离降压型开关电源主电路原理图

当开关管 S 导通时, 二极管 VD 截止, 输入的整流电压经 S 和 L 向 C 充电, 这一电流使电感 L 中的储能增加。当开关管 S 截止时, 电感 L 感应出左边负右边正的电压, 经负载 R 和续流二极管 VD 释放电感 L 中存储的能量, 维持输出直流电压不变。输出直流电压由加在 S 上的脉冲宽度确定。这种主电路使用元件少, 只需要开关管、电感、电容和二极管即可实现, 但是输入电源 U_i 的电流是脉动的。

输出电压因为占空比的作用不会超过输入电压, 而且二者极性相同, 关系为

$$U_o = D \cdot U_i \quad (1-1)$$

2) 无隔离升压型

无隔离升压型开关电源电路(或称升压斩波器, Boost 电路), 其主电路原理图如图 1-5 所示。

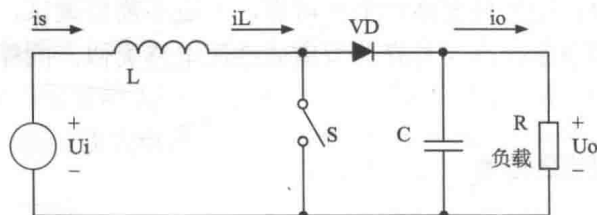


图 1-5 无隔离升压型开关电源主电路原理图

当开关管 S 导通时, 电源对电感 L 充电, 电感 L 储存能量。当开关管 S 截止时, 电感 L 感应出左边负右边正的电压 U_L , 该电压叠加在输入电压上, 输出电压将是输入电压 $U_i + U_L$, 使输出电压大于输入电压, 经二极管 VD 向负载供电,

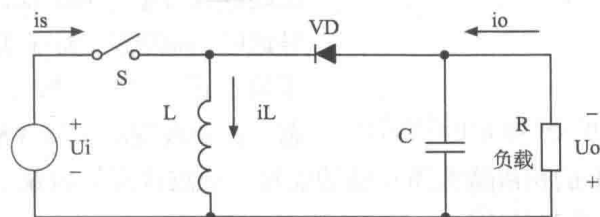
因而有升压作用。

输入和输出的电压极性相同，二者关系为

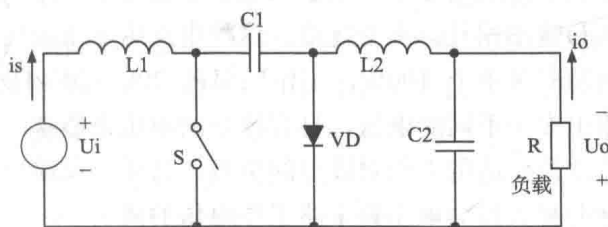
$$U_o = \frac{1}{1-D} U_i \quad (1-2)$$

3) 无隔离升降压型

无隔离升降压型开关电源的典型电路原理图如图 1-6 所示，图 1-6 (a) 电路又称为 Buck-Boost 电路，图 1-6 (b) 电路又称为 Cuk 电路。



(a) Buck-Boost 电路原理图



(b) Cuk 电路原理图

图 1-6 无隔离升降压型开关电源典型电路原理图

在图 1-6 (a) 中，无论开关管 S 之前的脉动直流电压高于还是低于输出端的稳定电压，电路均能正常工作。当开关管 S 导通时，电感 L 储存能量，二极管 VD 截止，负载 R 靠电容 C 上次的充电电荷供电。当开关管 S 截止时，电感 L 中的电流继续流通，并感应出上负下正的电压，经二极管 VD 向负载供电，同时给电容 C 充电。注意，负载电压的极性和输入电源的电压极性相反。

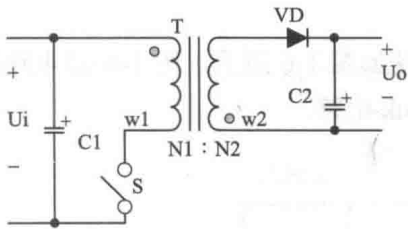
在图 1-6 (b) 中，当开关 S 闭合时，电源 U_i 对 L_1 充电。当 S 断开时，电压 U_i 叠加 L_1 上的感应电压 U_L 通过二极管 VD 对 C_1 进行充电。再当 S 闭合时，二极管 VD 关断， C_1 通过 L_2 、 C_2 滤波对负载放电， L_1 继续充电。 C_1 用于传递能量，而且输出极性和输入相反。此电路中，电源 U_i 的电流输出是连续的。

无隔离升降压型开关电源电路的输入电压和输出电压关系为

$$U_o = \frac{D}{1-D} U_i \tag{1-3}$$

4) 单端反激型

单端反激型开关电源的主电路如图 1-7 所示，这是一种低成本、目前广泛使用的



使用的基本电源。因为隔离型开关电路的变压器工作在高频状态，所以该变压器也称为高频变压器。单端是指高频变压器的初级线圈仅控制一端。反激是指当开关管 S 导通时，高频变压器 T 的初级绕组感应电压为上正下负，二极管 VD 处于截止状态，在初级绕组中储存能量。当开关管 S 截止时，变压器 T 的初级绕组所存储的能量，通过次级绕组及二极管 VD 整流和电容 C2 滤波后向负载输出。

图 1-7 单端反激型开关电源主电路原理图

单端反激型开关电源主电路中，由于负载位于变压器的次级且工作在反激状态，所以具有输入和输出相互隔离的优点。这种电路用变压器传递能量，适用于小功率电源，输出功率多小于 100W，工作频率在 20k~200kHz。单端反激型开关电源可以同时输出多个不同的电压，且有较好的电压调整率。缺点是输出的纹波电压较大，外特性差，适用于相对固定的负载。另外，单端反激型开关电源使用的开关管 S 承受的最大反向电压是电路工作电压的两倍。

在图 1-7 中，开关管 S 的控制信号是由单独的信号发生电路产生，如果简化电路，去掉单独的信号发生电路，使开关管起开关及振荡的双重作用，构成的是自激式开关电源，电路原理图如图 1-8 所示。其特点是电路简单、成本低，但是工作频率范围有限，纹波电压大。

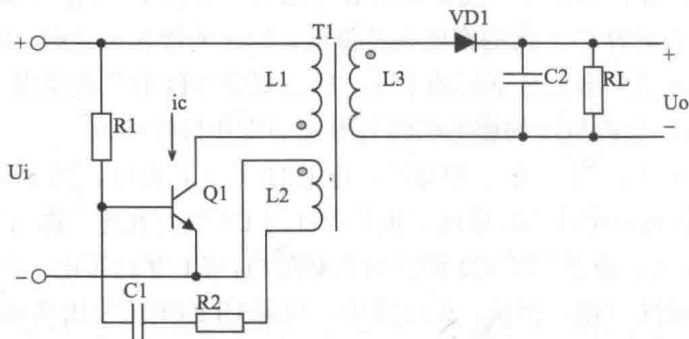


图 1-8 自激式开关电源主电路原理图

自激式开关电源的工作原理分析如下。

当接入电源 U_i 后, 经 R_1 给开关管 Q_1 基极提供启动电流, 使 Q_1 开始导通, Q_1 集电极电流 i_c 在 L_1 中线性增长, 在 L_2 中感应出使 Q_1 基极为正、发射极为负的正反馈电压, 使 Q_1 很快饱和。与此同时, 感应电压给 C_1 充电, 随着 C_1 充电电压增高, Q_1 基极电位逐渐变低, 使 Q_1 退出饱和区, i_c 开始减小, 在 L_2 中感应出使 Q_1 基极为负、发射极为正的电压, 使 Q_1 迅速截止, 这时二极管 VD_1 导通, 高频变压器 T_1 初级绕组中的储能释放给负载。在 Q_1 截止时, L_2 中没有感应电压, 直流供电输入电压又经 R_1 给 C_1 反向充电, 逐渐提高 Q_1 基极电位, 使其重新导通, 再次翻转达到饱和状态, 电路就这样重复振荡下去, 一直由变压器 T_1 的次级绕组向负载输出所需要的电压。

5) 单端正激型

单端正激型开关电源的主电路如图 1-9 所示。这种电路在形式上与单端反激电路相似, 但工作情形不同。当开关管 S 导通时, VD_1 也导通, 这时电源 U_i 向负载传送能量, 滤波电感 L 储存能量; 当开关管 S 截止时, 电感 L 通过续流二极管 VD_2 继续向负载释放能量。在电路中线圈 N_3 与二极管 VD_3 构成复位电路, 该电路将开关管 S 的最高电压限制在两倍电源电压之间。为满足磁芯的复位条件, 即磁通建立和复位时间应相等, 开关 S 控制脉冲的占空比不能大于 50%。

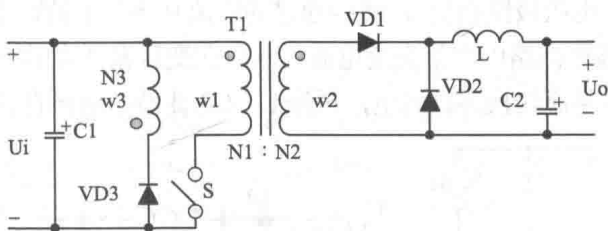


图 1-9 单端正激型开关电源主电路原理图

主电路在开关管 S 导通时, 通过变压器向负载传送能量, 所以输出功率范围大, 可输出 200W 甚至更大的功率。这种电路的缺点是变压器体积较大、多了磁芯复位电路, 使其实际应用受到限制。

6) 推挽型

推挽型开关电源的典型电路原理如图 1-10 所示, 高频变压器的初级线圈两头都受控, 属于双端控制变换电路。电路使用两个开关管 S_1 和 S_2 , 两个开关管在外激励方波信号的控制下交替导通和截止, 由变压器 T 的次级绕组得到方波电压,