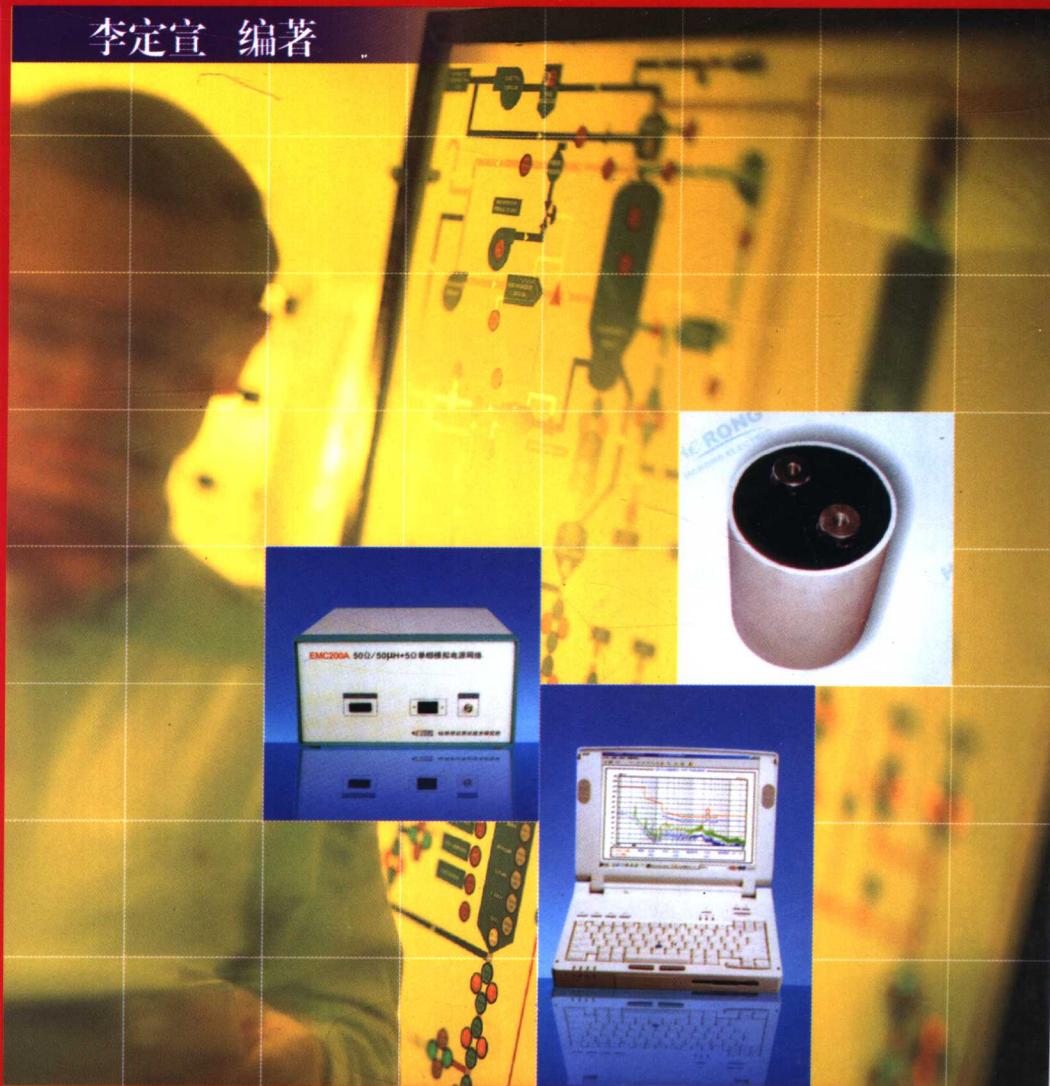


现代电源设计与应用丛书

开关稳定电源 设计与应用

李定宣 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

现代电源设计与应用丛书

开关稳定电源 设计与应用

李定宣 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本书是作者近二十年开关电源设计、制造及培训经验的总结。书中内容在讲解开关电源基础知识、变换器基本电路的基础上，针对开关电源的难点——稳定性的问题展开深入分析，给出了高频变压器、滤波电容器、滤波电感器、电流互感器、栅极驱动电路的稳定设计方法，对每一种设计方法都列举了设计实例以帮助读者理解应用。

同时本书重点对开关电源噪声抑制、散热系统、保护电路的设计方法做了较为详细的叙述，同样以实例说明。全书在最后列出了当前应用最多的近 20 个开关电源实用电路，在附录中收集了对于工程技术人员十分有用的 15 个技术资料，希望能对设计、研发工程师有所帮助。

本书可供从事开关电源设计、研发的技术人员及大专院校相关专业的师生参考、学习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

开关稳定电源设计与应用 / 李定宣编著. —北京: 中国电力出版社, 2006

(现代电源设计与应用丛书)

ISBN 7-5083-4184-8

I. 开… II. 李… III. 开关电源: 稳定电源—电路设计
IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 021528 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月北京第一次印刷

1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 20.5 印张 418 千字

印数 0001—4000 册 定价 32.00 元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

《现代电源设计与应用丛书》

编委会成员

主任委员：季幼章

副主任委员：王兆安 罗方林 倪本来

委 员：(以姓氏笔划为序)

刁成明	丁 钊	王其英	王 聪	艾多文
任元元	刘凤君	刘胜利	刘 勇	朱雄世
李龙文	李定宣	李厚福	阮新波	沙 斐
张广明	张占松	张谷勋	张忠相	张卫平
陆 鸣	陈永真	陈道炼	杨 耕	赵修科
赵良炳	赵建统	周维维	林周布	倪海东
郝晓东	徐德鸿	徐兰筠	徐泽玮	徐 云
贾玉兰	曹仁贤	龚幼民	郭黎利	康 勇
路秋生	熊兰英			

序 言



随着经济的发展和科技的进步，自 20 世纪 90 年代至今，我国以计算机、移动通信、信息网络为代表的信息产业高速发展；以电力系统、铁路系统、通信系统为代表的传统工业需要进行全面改造；节约型社会的建设工作正在进行。所有这些都成为中国电源产业和电源技术大发展的推动力。

目前世界排名前列的电源设计、制造企业的主体部分都设在中国，并在北京和上海等城市建有研发中心。中国企业已从原来简单的仿制向自主设计、研发转型，因此电源产品的研发设计人员需求猛增。而对于大部分的研发人员，设计与应用都是工作中的难点，本套丛书力图解决他们的难题。丛书由中国电源学会组织电源行业的专家、学者、工程技术人员共同编写，并不断吸纳符合要求的作者参加编写。丛书由中国电力出版社陆续出版。

本套丛书有如下特点：

1. **全面** 涵盖现代电源技术的各个方面。
2. **实例** 丛书在阐述设计思想、设计方法的同时，在应用部分辅以完整的设计实例，使读者在学习的基础上，根据实例就能做出相应的电源产品，这样就能解决他们的应用难题。
3. **先进** 涉及最新电路拓扑、功率器件和控制集成电路，力争体现出国内电源设计与应用领域的最高技术水平。
4. **作者** 作者绝大部分是在研发一线工作多年，有丰富实践经验的专家、工程师，他们能带来最新的技术和对实际工作有指导意义的方案。

本套丛书以电源设计、研发的工程技术人员为主要读者对象，也可供科研人员和大专院校的师生参考。

现代电源技术和产品向高效率、低损耗、小型化、集成化、智能化、高可靠性方向不断发展，我们顺应发展组织了这套丛书，希望能对您的工作和学习有一定帮助。

我们衷心希望广大读者对这套丛书提出宝贵的意见和建议。我们的联系方式是 ding_zhao@cepp.com.cn。

《现代电源设计与应用丛书》编委会

前 言



本书是在作者多年培训授课经验，十余年从事电源设计、制造的实际工作经验和收集国内外有关开关电源的参考书籍、期刊文献中有益知识的基础上编著而成。

本书从第一章开关电源的基础知识、第二章开关电源变换器的基本电路入手，叙述了开关电源的基本特性、分类、性能参数、应用领域。这两章通过四个非隔离式基本 DC—DC 变换器，五个隔离式基本 DC—DC 变换器及自激式变换器的电路结构形态、工作原理及相关参数关系式，帮助读者理解开关电源的基础知识和基本电路的工作原理，构建一个框架，铺垫一个阶梯。然后，按照开关电源的基本组成单元，从第三章至第十二章有层次地介绍这些基本单元电路的设计原则、方法及相关参数选取的依据和计算公式，并列举了应用设计实例，以加深理解应用。其中对一般参考书上不多见的开关电源保护电路、噪声抑制、散热系统设计作了较为详细的叙述。开关电源效率是人们普遍关心的问题，第十三章简述了提高开关电源效率的一些主要途径。第十四章给出了几乎包括所有常见开关变换器电路结构的实用电路，并对其工作原理作了简述，供读者参考。书后的附录收集了对从事开关电源设计、应用的工程技术人员十分有用的资料。

作者的初衷是想将本书作为一种实用性工具，奉献给从事开关电源设计、应用的工程技术人员。为此在编写过程中，在理论、工作原理简述的基础上，尽量侧重于实用性。能否达到此目的，只能由读者评判和实践证实。

本书的编著和出版得到中国电源学会季幼章、倪本来先生的鼓励、指导和帮助以及中国电力出版社的大力支持，相识和不相识的各位同行给予的教益，在此深表谢意。

由于开关电源所涉及的知识面和技术领域非常广，其技术发展和应用日新月异，加上本人能力和知识的局限，书中定有偏颇和表达不清之处，敬请各位专家、同行、读者批评指正。

编 者

目 录



序言
前言

第一章 开关电源的基础知识 1

- 第一节 开关稳压电源和线性
串联稳压电源 1
- 第二节 开关电源的分类 3
- 第三节 对开关电源的基本要求 ... 5
- 第四节 开关电源的应用 8
- 第五节 开关电源技术的发展 10
- 第六节 恒压源与恒流源 13
- 第七节 开关电源中的功率
开关器件 16

第二章 开关电源变换器的 基本电路 18

- 第一节 概述 18
- 第二节 降压型 (Buck)
变换器 18
- 第三节 升压型 (Boost)
变换器 25
- 第四节 极性反转升降压
(Buck—Boost)
变换器 31
- 第五节 Cuk 变换器 37
- 第六节 四种基本变换器主要
参数一览表 43
- 第七节 自激式开关变换器 45
- 第八节 单端正激式变换器 56
- 第九节 单端反激式变换器 63
- 第十节 推挽变换器 71
- 第十一节 半桥变换器 76

- 第十二节 全桥变换器 82
- 第十三节 五种隔离式 DC/DC
变换器综合性能表 ... 88

第三章 开关电源高频变压器 设计 91

- 第一节 变压器基础知识 91
- 第二节 开关电源变压器
磁芯的选择 94
- 第三节 高频变压器设计要求
与原则 98
- 第四节 高频变压器设计方法 ... 105
- 第五节 小结 114

第四章 开关电源滤波电容器 设计 116

- 第一节 概述 116
- 第二节 电解电容器的特性 116
- 第三节 开关电源滤波电容器的
选取原则与安装 118
- 第四节 开关电源输入滤波
电容器设计计算 121
- 第五节 开关电源输出滤波
电容器设计计算 126

第五章 开关电源滤波电感器 设计 130

- 第一节 概述 130
- 第二节 开关电源输出滤波
电感器设计 132
- 第三节 输出滤波电感器设计
实例 137

第六章 整流二极管及输出 整流电路	142
第一节 开关电源中的整流 二极管	142
第二节 整流二极管的特性 与参数	143
第三节 整流二极管参数选取 原则	146
第四节 整流电路的结构形式	149
第五节 同步整流电路	152
第七章 开关电源电流取样检测	154
第一节 电流取样的必要性 和作用	154
第二节 电流取样的基本模式 和方法	155
第三节 电流互感器设计	158
第四节 电流互感器设计实例	162
第八章 栅极驱动电路设计	167
第一节 概述	167
第二节 栅极驱动电路参数设计 基本原则	170
第三节 脉冲变压器设计	174
第四节 栅极驱动应用电路结构 形态实例	179
第九章 开关电源噪声及抑制	185
第一节 概述	185
第二节 开关电源噪声	185
第三节 开关电源噪声抑制	187
第四节 线路滤波器设计	197
第五节 噪声抑制对策实例 分析	199
第十章 开关电源保护电路	200
第一节 概述	200

第二节 防浪涌冲击电流电路	200
第三节 开关电源过电压、欠 电压保护电路	205
第四节 过热保护电路	207
第五节 缺相保护电路	209
第六节 短路与过流保护 电路	210
第七节 保护电路的运用 与验证	216

第十一章 开关电源并联系统 均流

第一节 并联系统负载均流 方法	218
第二节 UC3907 均流专用控制 集成电路	220
第三节 UC3907 负载均流应用 电路	224

第十二章 功率器件散热器的 安装

第一节 概述	228
第二节 功率器件散热系统的 等效电路	228
第三节 单体半导体器件的结温 与允许功耗	230
第四节 功率器件安装散热器的 选取	231
第五节 散热器的安装	236

第十三章 提高开关电源效率的 途径

第一节 效率及其测量方法	238
第二节 引起开关电源效率 降低的原因	240
第三节 提高开关电源效率的 主要途径	242

第十四章 开关电源实用电路 249

第一节 单片功率控制芯片构成
隔离式开关稳压
电源 249

第二节 MC 33063/34063 单片控
制芯片构成非隔离
稳压电源 251

第三节 MC3172 控制芯片构成
多路输出电源 253

第四节 智能型功率开关(BTS412)
构成 +12V/1A 开关
稳压器 253

第五节 双独立功能控制芯片的
正、负电源 254

第六节 开关管压降作电流传
感器的单端反激
变换器 255

第七节 +5V/2A 准谐振电压
变换器 257

第八节 5V/20A 推挽变换器
稳压电源 258

第九节 5V/20A 半桥 ZVC—QRCS
型变换器 260

第十节 12kV/0.2mA 小型高压
电源 261

第十一节 +48V/50A 开关稳压
电源 262

第十二节 315A—400A 逆变
焊接电源 265

第十三节 1000A/12V 移相控
制软开关全桥
变换器 268

第十四节 5000V/0.5A 高压输
出全桥变换器 273

附录 276

附录 A 主要名词解释 276

附录 B 开关电源常用 PWM 控制
集成电路 281

附录 C 开关电源常用磁芯 288

附录 D 开关电源中的三端
集成稳压器 295

附录 E 开关电源控制电路常用
调节器 297

附录 F 集肤效应与穿透
深度 301

附录 G 开关电源变压器
设计参数表 (见表
G-1) 303

附录 H 不同变换器电路中输入、
输出电容的纹波
电流 (见表 H-1) ... 305

附录 I 开关电源中不同波形的
有效值与幅值的关
系式 (见表 I-1) 307

附录 J 开关管的热损耗 308

附录 K 开关电源输入电网配
电容容量 309

附录 L IGBT 使用中的几个
问题 310

附录 M 常用稳压二极管标
称值 (见表 M-1) ... 314

附录 N TL431 程控并联
稳压器 315

附录 O 通过开关管集电极电压、
电流波形判断变换器工作
正常与否 318

参考文献 320

第一章 开关电源的基础知识

第一节 开关稳压电源和线性串联稳压电源

在直流稳压电源中，目前主要采用串联稳压方式和开关稳压方式，它们都是利用电子线路反馈控制技术实现输出电压稳定的。线性串联稳压电源是当输入或输出电压变化时，通过连续线性调整功率管的压降获得稳定的输出电压。而开关稳压电源是通过调整功率管的导通（或截止）时间获得稳定的输出电压。在正常工作情况下，串联稳压电源中的功率调整管始终处于导通状态，而开关稳压电源中的功率开关管在一个周期内，一部分时间处于导通状态，另一部分时间处于截止状态，而且导通时处于饱和导通状态。而串联稳压电源的功率调整管不能工作在饱和状态，只能工作于线性放大状态，否则无法实现稳压调整功能。

一、开关稳压电源与线性串联稳压电源的基本电路

图 1-1 为线性串联稳压电源的原理图，简要说明如下。

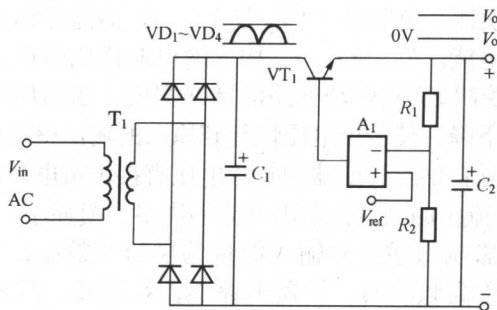


图 1-1 线性串联稳压电源原理图

市电经工频变压器 T_1 降压，通过 $VD_1 \sim VD_4$ 和 C_1 整流滤波为直流电压，提供稳压器的供电电源，经 R_1 、 R_2 、 A_1 输出取样比较。 A_1 输出的误差电压加至调整管 VT_1 的基极，改变 VT_1 的管压降。输出电压升高时， VT_1 的管压降增大，使输出电压 V_o 重新恢复到原来的整定值。

这种电路的特点是： T_1 工作于市电频率，体积大而且笨重，效率低；整流管流过与输出负载电流相同的电流，使损耗增大；为减少纹波，输入滤波电容量要求大，否则脉动电压增大，使 VT_1 的损耗增加；通过线性调节 VT_1 的管压降，维持输出电压稳定， VT_1 将无用功率以热能释放，效率低（ VT_1 类似一个可变电阻用于调压，电阻越大，损耗的功率越大）。但这种电源结构简单，稳压性能好，无高频噪声污染。

图 1-2 为开关稳压电源的原理图，简要说明如下。

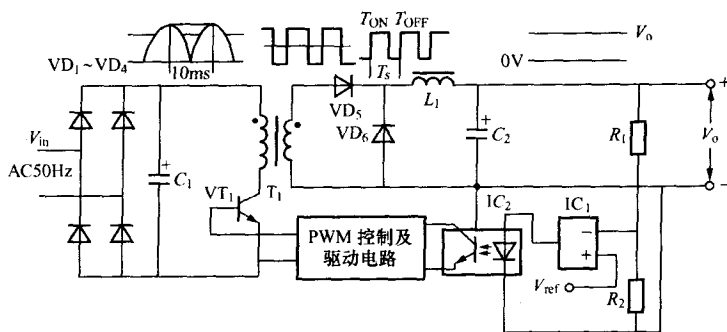


图 1-2 开关稳压电源原理图

图 1-2 是一个单端正激式开关变换电路，市电经 $VD_1 \sim VD_4$ 全桥整流、 C_1 滤波形成高频逆变器的直流供电电压。 VT_1 在高频 PWM 驱动脉冲的作用下，以高频（通常在 20kHz 左右）不断处于关断、接通状态。高频变压器一、二次侧两端产生与 VT_1 开关频率 f_s 相同的高频脉冲，正脉冲（ VT_1 导通时间内），一次侧的能量因 VD_5 导通而传输至二次侧，负脉冲（ VT_1 截止）， C_1 储能经续流二极管 VD_6 和负载形成回路为负载提供电能。 R_1 、 R_2 、 IC_1 构成输出取样比较放大电路。误差电压经光耦合器 IC_2 隔离，控制 PWM 驱动电路的脉冲宽度。当输出电压升高时，使其驱动脉宽变窄，平均值下降，使输出电压恢复到原来的输出整定电压。

这种电路的特点是：供给逆变器的直流电压直接由市电整流滤波获得，无工频 50Hz 变压器，流过整流桥的电流比输出电流小许多，损耗小；输入滤波电容 C_1 因电压高，容量小不会影响对逆变器输入能量的供给及效率； T_1 工作于高频状态，体小而轻； VT_1 工作于高频状态，导通损耗小，效率高，但增加了开关损耗及噪声；通过脉宽调制，把与脉宽成比例的方波电压加在变压器 T_1 上，维持输出电压的稳定；输出整流二极管 VD_5 、 VD_6 工作在高频状态，恢复时间的存在，会产生噪声。电路结构相对于串联稳压电源而言较复杂，一般情况下输出纹波及稳定精度不如串联稳压电源。

二、开关稳压电源与线性串联稳压电源主要性能比较

开关稳压电源和线性串联稳压电源主要性能比较见表 1-1。

表 1-1 开关稳压电源与线性串联稳压电源主要性能比较

项目内容		线性串联稳压电源	开关稳压电源
1	控制方式及功率管工作状态	调整串联晶体管的压降, 串联调整管处于线性工作状态	调脉宽或频率, 功率管处于不断关断和接通状态
2	输入电压适应性	输入电压变化大时效率低	允许输入电压变化范围大
3	效率	效率低, 一般 < 70%, 损耗以热能耗散在调整管上, 输出电压一定时, 输入电压越高损耗越大, 效率越低	效率高, 一般在 80% ~ 90% 范围内, 功率管只有关断、开通损耗和导通损耗
4	电路结构	简单, 变压—整流—反馈稳压控制	较复杂, 输入整流—高频逆变—变压—高频整流—脉宽调制—驱动控制
5	纹波与噪声	纹波小 (0.1 ~ 10mV), 完全来自输入整流脉动成分, 高增益带宽放大器可使纹波降低	稍大 (几十毫伏至几百毫伏), 除低频脉动纹波外, 还有开关基频及过渡状态产生的尖峰开关噪声。放大器反馈系统的响应频率低, 一般不能降低 20kHz 以上的纹波成分, 需加滤波技术。如常模 LC 滤波及共模滤波器
6	源效应	$\leq 1 \times 10^{-4}$ 或更高 (10^{-5})	$\leq 1 \times 10^{-3}$ 或更低 (10^{-2})
7	负载效应	$\leq 1 \times 10^{-4}$ 或更高 (10^{-5})	$\leq 1 \times 10^{-3}$ 或更低 (10^{-2})
8	尺寸	大, 有工频变压器及散热器	小, 无工频变压器, 是同等容量串联稳压电源的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}$
9	重量	重, 有工频变压器及为调整管加装的散热器	轻, 约是同等容量串联稳压电源的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}$
10	价格	便宜	较贵, 功率越大价格相差越小, 有接近趋势
11	可靠性	元器件少, 可靠性较高 (但要使调整管充分散热)	因温升高, 元器件和控制技术成熟, 可靠性与线性串联稳压电源相同
12	应用场合	高精度电源, 实验室可变电源, 用于输出功率在 20W 以下的场所	要求高效、尺寸小、重量轻的各种机内电源、直流供电设备, 功率为几瓦至数十千瓦

第二节 开关电源的分类

开关稳压电源的构成方法很多, 其分类方法也多得使人无所适从, 下面介绍其

中的几种分类方法，供读者参考。

一、按输出能量的形式分类

- (1) 直流开关电源 其输出是高质量的直流电能。
- (2) 交流开关电源 其输出是高质量的交流电能。

二、按驱动方式分类

(1) 自激式开关电源 其借助于变换器自身的正反馈控制信号，实现开关自持周期性开关。开关管起着振荡器件和功率开关的作用。如单管振铃扼流圈变换器，即称 RCC 变换器；双管单变压器罗耶尔 (Royer) 电路；双管双变压器詹森 (Jensen) 变换器电路。

(2) 他激式开关电源 其电源内部备有专门独立的振荡电路，与振荡器同步的控制信号驱动开关管。如图 1-2 所示的单端正激式开关电源电路就是其中一例。它使用专用的脉冲调宽控制器 PWM 芯片或分立电路。

三、按能量转换过程的类型分类

(1) 直流—直流 (DC—DC) 变换器 它是将一种直流电转换成另一种或几种直流电。DC—DC 变换器是直流开关电源的核心部件，也是非隔离式或隔离式变换器直流电源的重要组成部分。

(2) 逆变器 (DC—AC) 它是将直流电转换成交流电的开关变换器，有的称其为变流器，是交流输出开关电源和不间断电源 (UPS) 的主要部件。

(3) 开关整流器 (AC—DC) 它是将交流电转换成直流电能的一种电源装置，这种变换器其变换过程应该理解为交流—直流—交流—直流 (AC—DC—AC—DC)。图 1-2 所示的开关电源就是这种电能转换的装置。

(4) 交流—交流变频器 (AC—AC) 它是将一种频率的交流电直接转换成另一种恒频或可变频率的交流电，或是将变频交流电直接转换成恒频交流电的变换装置。

四、按输入与输出是否隔离分类

(1) 隔离式开关变换器 它是高频变压器将变换器的一次侧 (输入) 与二次侧 (输出) 隔离。这种变换器结构主要有单端正激式变换器、单端反激式变换器、中心抽头式 (推挽) 变换器、半桥式变换器、全桥式变换器。

(2) 非隔离式开关变换器 它是在电气上输入与输出不隔离的。输入与输出共用一个公共端。这种变换器结构主要有降压型 (Buck) 变换器、升压型 (Boost) 变换器、降压—升压 (Buck—Boost) 变换器以及它们的组合变形电路，如 Cuk 变换器、Zeta 变换器、Sepic 变换器等。

五、按功率开关管关断和开通工作条件分类

(1) 硬开关变换器 功率开关器件是在承受电压或电流应力的情况下接通或关断的。这样不但产生开关损耗,而且形成开关尖峰干扰噪声,需要附加屏蔽、滤波等抗噪声技术,才能满足高精度、高性能用电设备的要求。

(2) 软开关变换器 功率开关器件是在不承受电压或电流应力的情况下接通或关断的;或是加于开关管上的电压为零,称零电压开关(ZVS);或是流过开关管的电流为零,称零电流开关(ZCS)。因开关过程中无电压、电流重叠(理想情况),开关损耗大大降低,而且开关噪声电压小,有利于开关变换器的高频化、小型化。

第三节 对开关电源的基本要求

电源是一切电子设备的动力源,是保证电子设备正常工作的基础部件。据相关统计,电源故障约占电子设备整机故障率的40%~50%。为此,对电源必须提出一些基本要求,包括使用性能要求和电气性能要求。

一、使用性能要求

1. 高的可靠性 平均无故障工作时间 MTBF 是衡量电源可靠性的重要指标,在通用电源的标准中规定,可靠性指标 $MTBF \geq 3000h$ 是最低要求。某些领域如通信电源、航空航天电源、电力操作电源要求可靠性指标比较高,否则无法满足用户的使用要求。目前由于元器件制造技术与工艺的不断成熟,设计技术的完善与精密,电源模块的平均无故障工作时间 MTBF 可达到 500000h 以上。

2. 高的安全性 设计制造出的开关电源,应符合相关标准或规范中规定的安全性指标要求,如绝缘要求、抗电强度要求、防人身触电要求等,以防止在极限状态或恶劣环境条件下,出现电源故障并危及人身和设备安全。

3. 好的可维修性 平均故障维修时间 MTTR 是衡量电源可维修性的重要指标。电源出现故障时,应能及时诊断出故障现象及部位,无需使用专用工具或不需熟练技工就能在较短的时间内,排除故障、替换故障部件或模块。一般要求 $MTTR < 30min$ 。这除了要求电源有故障自诊断功能外,必须采用先进的设计、制造技术和工艺,如标准化、模块化、电力电子集成等设计制造工艺。

4. 高的功率密度 提高电源单位体积的功率容量 (W/cm^3) 及单位质量的功率容量 (W/g),以减少电源的体积和质量,便于用户安装、集成、移动及使用。实现高功率密度的关键是提高开关频率、减少损耗,与此相应的是要求应用低损耗功率器件、高导热、高绝缘性能的绝缘材料,应用软开关电路结构。

5. 高性价比、低使用维修费用 高的性价比是电源制造商和用户双方都追求

的目标,更是市场经济条件下竞争的主要条件。低的使用与维修费用,是用户投资与回报必须关注的问题。

6. 环境适宜性要求 环境适宜性要求包括工作温度、储存温度范围、环境温度、对源电压品质及周围环境净化程度等。高品质的电源对环境的适应能力强,要求比较宽松,这些要求应以符合相关标准或满足合同要求为前提。

二、电气性能参数

电源的电气性能参数通常包括电源输入特性参数、输出特性参数以及必要的附加功能。

1. 源电压特性

(1) 源电压类型 直流或交流。交流输入时是单相或是三相交流电源。

(2) 源电压允许变化范围 源电压在此范围变化时,电源能保证正常工作,并且输出电压或输出电流等电气参数符合产品标准要求。通常在三相输入时取 $\pm 15\%$ 的波动率。

(3) 源电流 开关电源的源电流一般情况下不是正弦波,它的方均根值是正弦波的2.12倍(见附录K)。指出电源的源电流是必要的,这样可以提供用户安装相应的配电盘。

(4) 源功率因数 开关电源的源电流波形与源电压相位差的余弦与电流波形畸变因子的乘积即为功率因数。它反映出开关电源装置接入电网后对电网产生影响的程度,同时也影响开关电源的效率,一般功率因数 $PF \geq 0.8$ 。

2. 效率 电源的效率是指输入功率能传输到输出的程度,或者说是输出功率与输入功率之比的百分数。减少的那部分能量,通过热辐射和热传导耗散掉了。耗散的功率 P_L 可表示为 $P_L = P_o \left(\frac{100}{\varphi} - 1 \right)$, P_o 为输出功率, φ 为效率。

3. 源效应(电网电压调整率) 是指在额定或规定的负载范围内,输入电压在规定的允许范围内变化时,引起输出电压变化量与输出额定电压整定值之比的百分数。输入电压一般应取波动下限、标称值和上限三点。测量输出电压的变化量,则源效应 $CV = |V_{ON} - V_o| / V_{ON} \times 100\%$ 。式中 V_{ON} 为源电压在额定标称值时的输出电压; V_o 为源电压波动时的输出电压。对恒流源而言,源效应是指输入电网电压在规定的允许范围内变化时,引起输出电流变化量与输出电流设置值之比的百分数,即 $CC = (\Delta I_o / I_{ON}) \times 100\%$ 。

4. 负载效应(负载调整率) 是在规定的源电压(可以是标称值源电压,也可以是源电压的允许下限或上限)下,负载电流从空载(也可以按产品标准规定的某一轻载)至满载变化时,引起输出电压的变化量与输出整定值之比的百分数。

5. 输出电压额定值 输出电压额定值是指在规定的输入电压下,满载时整定的输出电压值。恒压性能好的电源在输出空载及满载条件下,应该保持输出电压不

变。不允许输出电压在空载时有较大的上冲，以免危害供电设备。

对要求输出电压可调的电源产品，应规定输出电压可调范围。

6. 输出电流额定值 输出电流额定值是指电源产品在规定输入电压和整定输出电压条件下，可输出的最大负载电流值。该值不应低于产品标准规定。

对要求输出电流可调的电源产品，应规定输出电流可调范围。例如（3% ~ 100%）额定值，在调节范围内规定的各电流基准设置点上，应具有恒流特性。

7. 输出纹波与噪声 开关电源的输出纹波电压除了输入整流脉动成分外，主要是开关频率基波纹波，呈锯齿波状，同时还有功率开关管在导通—截止过渡状态产生的尖峰噪声重叠在锯齿波上，如图 1-3 所示。用示波器观察输出纹波，当扫描频率低时，可能只观察到整流脉动的低频成分，开关频率基波纹波被低频所调制。观察基波纹波，扫描频率应与开关频率相匹配。在产品标准中，纹波电压可用峰-峰值 V_{p-p} 或有效值 V_{Rms} 表示。

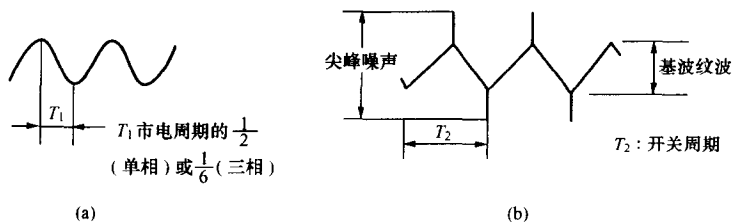


图 1-3 开关电源的纹波电压波形

(a) 低频纹波；(b) 高频纹波

8. 输入过压保护 输入过电压保护是指当输入电压高于允许的波动上限值时，电源应进入自动保护状态（关机或警示，由标准规定），输入电压低于输入电压允许上限时能自行恢复。

9. 输入欠压保护 输入欠压保护是指当输入电压低于允许的波动下限值时，电源应进入自动保护状态（关机或警示，由标准规定），输入电压高于输入电压允许下限时能自行恢复。

10. 输出过压保护 一般情况输出是不会出现过压的，只有当电源出现故障或失控时才会出现过压现象。过压会对设备造成危害，必须采取保护措施。通常当输出电压 V_o 处于： 105% 标称值 $< V_o < 115\%$ 标称值时，电源进入保护状态（关机或警示，由产品标准或用户合同规定），同时切断输入电源，对电源进行故障维修。

11. 输出欠压保护 输出欠压保护是对固定输出电压的电源，当输出电压低于规定设置时，电源进入自动保护状态。通常当输出电压 $< 85\%$ 额定输出电压时，使电源进入保护。可调输出电压以及具有恒流限压的电源，不设欠压保护功能。

12. 输出过流保护 输出过流保护是指当负载电流超过电源整定的最大输出电流一定倍率或当输出出现短路时，电源应自动进入保护状态，或者是关机，或者是

恒流在一个允许的安全值内，避免电源损坏。

13. 功率器件过热保护 开关电源功率器件过热是造成器件损坏和可靠性降低的重要原因，尤其是大功率输出的电源装置。功率器件（IGBT 模块或高频整流快恢复二极管模块）一般价格较高，应设置过热保护电路。当紧靠功率器件散热器表面温度超过规定的设置温度时，电源应进入保护状态。对 IGBT 模块而言，过热保护温度阈值设计在 $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 是比较安全的。在电源产品设计定型试验时，在高温 $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的环境中，加满载测试。气流方向和安装方式不同，热点也不同，应检测热点温度。

三、其他性能要求

电磁兼容性应符合相关标准要求；多个电源模块并联构成系统时应有均流偏差要求；当远距离操作时，用计算机可实现遥控、遥调、遥测、遥信功能等。

第四节 开关电源的应用

开关电源是 20 世纪 60 年代电源历史上的一次革命，安装于各种家用电器、工业设备及军用电子装置中，同时作为赋能装置应用于各个领域。下面列举开关电源应用领域的一些例子。

一、金属焊接与切割电源

世界生产的钢材约 50% 需要焊接加工成构件，才能使用，每生产 1 万 t 钢，就需要相应生产 20 ~ 25 台焊机以满足加工需求。高频开关整流焊接电源在体积、质量、节能及焊接性能等方面是传统焊接电源无法比拟的，已取代传统焊接电源，广泛用于焊接行业。

二、表面处理工程

用于电镀行业的整流电源，其特点是低电压、大电流。高频逆变开关整流电镀电源与二极管的硅整流电源、晶闸管整流电镀电源相比，除了体积小、质量轻、效率高之外，还有可控性好、稳压稳流精度高、易于并联、易于实现计算机监控、故障检测安全控制，而且镀层品质大大提高。直流电镀与脉冲电镀相结合，可获得无裂缝、耐腐蚀能力和耐磨能力强、均匀的镀层表面。

用于工业设备和武器装备、舰船维修的电弧热喷涂工艺，应用高频开关电源电弧为热源，对解决涂层结构致密、低孔隙率、高强度、耐磨、防热腐蚀具有广泛的应用前景。

用于塑料表面处理，采用工作电压 10 ~ 13kV，开关频率 10 ~ 36kHz 的高压开