



“十三五”国家重点图书出版规划项目
航天先进技术研究与应用系列

MODERN HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER
SUPPLY TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

现代高频开关电源技术与应用

● 贲洪奇 孟 涛 杨 威 等编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十三五”国家重点图书出版规划项目
航天先进技术研究与应用系列

MODERN HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER
SUPPLY TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

现代高频开关电源技术与应用

● 贲洪奇 孟 涛 杨 威 等编著

常州大学图书馆
藏书章



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书结合电力电子技术的发展现状,对高频开关电源技术进行了较为全面的论述,主要包括高频开关电源的主要技术规范、系统构成、典型电路、电源中的典型磁性器件及其设计方法、控制技术、开关电源中的有源功率因数校正技术、开关电源的并联均流技术、可靠性设计与热设计,以及高频开关电源设计方法的应用实例等。

本书侧重于现代高频开关电源设计及相关技术的实际应用,便于读者掌握现代高频开关电源的设计方法,可以作为高校电力电子与电力传动等有关学科或专业研究生、本科生的教材或参考书,也可供有关专业科研人员及从事高频开关电源研发设计、生产的工程技术人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代高频开关电源技术与应用/贲洪奇等编著. —
哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2018.3
ISBN 978-7-5603-7226-6

I. ①现… II. ①贲… III. ①开关电源
IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 018887 号

策划编辑 王桂芝
责任编辑 李长波
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.75 字数 420 千字
版 次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-7226-6
定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前言

随着电力电子技术的不断进步及社会发展的需要,高频开关电源因其具有体积小、效率高、质量轻、动态响应特性好等诸多优点,在工业加工(如焊接、电镀、水处理等)、航空航天、通信、计算机和家用电子设备等领域逐步取代了线性电源和相控电源,并在电源领域占据了主导地位,获得了广泛应用。高频开关电源也由此成为各种电子设备或电子系统高效率、低功耗、安全可靠运行的关键,高频开关电源技术也成为电力电子学科中备受关注的领域。

作者在查阅了大量高频开关电源方面的论文、资料和书籍的基础上,集多年来从事电源方面教学工作的体会以及从事电源方面科研工作的经验,并结合国内外电力电子技术的发展状况及高频开关电源方面的相关研究成果,全面系统地介绍了高频开关电源的系统构成、技术规范、工作原理、典型电路和控制技术等内容,并注重高频开关电源设计及相关技术的实际应用。为便于读者在高频开关电源设计实践中的应用和理解,书中增加了“开关电源设计实例与调试”一章。全书主要包括以下几方面内容:

- (1)开关电源及其技术指标;
- (2)开关电源典型电路设计;
- (3)开关电源中磁性器件设计;
- (4)开关电源中的控制技术;
- (5)开关电源中的有源功率因数校正技术;
- (6)开关电源中的热设计;
- (7)开关电源的并联均流技术;
- (8)开关电源的可靠性设计;
- (9)开关电源设计实例与调试。

考虑到目前开关电源的控制技术正由模拟控制方式向数字控制方式发展,在开关电源控制技术部分从数字控制电源的定义与构成、实现方式及特点等方面对开关电源数字控制技术做了简要介绍;在开关电源的并联均流技术部分对数字均流方法的基本原理、实现途径等方面进行了介绍。本书第1章、第6章由贲洪奇撰写,第2章、第9章由杨威撰写,第3章、第5章5.4节和5.5节由孟涛撰写,第4章、第5章5.1~5.3节由吕观顺撰写,第7章、第8章由孙绍华撰写。

本书可以作为高校电力电子与电力传动等有关学科或专业研究生、本科生的教材或参考书,也可以供有关专业科研人员及从事高频开关电源研发设计、生产的工程技术人员

阅读使用。

在撰写本书过程中,参考了国内外有关单位和学者的著作或文章,在此对文献作者表示衷心的感谢!

由于高频开关电源所涉及技术领域非常广泛,其技术发展和应用日新月异,还有许多有价值的研究成果无法在本书中逐一介绍;同时由于作者知识和能力的局限,书中存在疏漏和不足之处也在所难免,敬请各位同行和广大读者批评指正。

作者

2018年1月

目 录

第 1 章	开关电源及其技术指标	1
1.1	开关电源的定义与结构形式	1
1.2	开关电源分类	4
1.3	开关电源的主要技术指标	5
1.4	对开关电源的使用要求	11
第 2 章	开关电源典型电路设计	13
2.1	输入回路设计及其应用	13
2.2	功率变换电路的设计	24
2.3	新型整流电路及其应用	37
2.4	保护电路	44
2.5	隔离式反馈电路	50
2.6	驱动电路	52
2.7	开关电源中的吸收电路	58
第 3 章	开关电源中磁性器件设计	64
3.1	磁性器件设计基础	64
3.2	磁性材料和磁芯结构	76
3.3	电感	80
3.4	高频变压器	86
3.5	高频变压器的设计方法	94
3.6	电感的设计方法	107
3.7	电流互感器的设计	113
第 4 章	开关电源控制技术	118
4.1	开关电源控制基础	118
4.2	电压型 PWM 控制技术	122
4.3	电流型 PWM 控制技术	125
4.4	峰值电流型控制模式的理论分析	128
4.5	反馈补偿网络设计	136
4.6	开关电源数字控制技术	148
第 5 章	开关电源中的有源功率因数校正技术	156
5.1	提高功率因数的必要性	156
5.2	典型的单相 Boost APFC 变换器	162
5.3	APFC 的控制策略	166

5.4	典型单相 Boost APFC 变换器的改进	174
5.5	典型的三相 APFC 变换器	187
第 6 章	开关电源中的热设计	199
6.1	功率半导体器件结温与损耗	199
6.2	热的传输方式	203
6.3	功率半导体器件散热系统的等效	205
6.4	功率半导体器件的散热设计	208
6.5	强制风冷设计	214
第 7 章	开关电源并联均流技术	217
7.1	并联电源系统概述	217
7.2	并联时采取均流技术的目的	220
7.3	常用均流方法	222
7.4	常用均流方法比较	227
7.5	数字均流方法及实现	228
第 8 章	开关电源的可靠性设计	232
8.1	可靠性定义、衡量指标及影响因素	232
8.2	提高可靠性的途径与设计原则	234
8.3	开关电源电气可靠性设计	237
8.4	开关电源可靠性热设计	240
8.5	开关电源的安全性设计与三防设计	243
第 9 章	开关电源设计实例与调试	245
9.1	技术指标与系统结构	245
9.2	有源功率因数校正电路设计	246
9.3	DC/DC 功率变换电路设计	251
9.4	整机调试与电性能实验	267
参考文献		271

第 1 章 开关电源及其技术指标

由于开关电源与线性电源相比具有效率高、体积小、质量轻等诸多优良性能,自 20 世纪 60 年代出现至今,已应用到需要电源赋能的各种电子设备和电气控制系统中,其相关技术也伴随着电力电子技术的发展而不断发展。同时,人们对各种电子设备小型化、轻量化的要求不断提高,迫切需要体积小、质量轻、效率高、性能好的新型电源,这成为促进开关电源技术不断发展、进步的又一强大动力。

1.1 开关电源的定义与结构形式

在说明开关电源之前,有必要先对“电源”做一说明。我们通常所说的电源,按其功能可分为产生电能的电源和变换电能的电源两大类。其中,产生电能的电源,能够把机械能、热能、化学能等其他形式的能转换成电能,比如发电机、光伏电池等,一般称这种电源为一次电源(即供电电源);变换电能的电源,则能够在供电电源与负载之间对电能的形态进行变换和稳定控制,比如将交流电转换成直流电或将直流电转换成交流电,对电压或电流幅值进行变换或提高其稳定度,对交流电的频率或相数进行变换,等等,一般称这种电源为二次电源。可见,产生电能的电源的输出是电能而输入则不是,而变换电能的电源的输入输出均是电能,这是它们的显著区别。

1.1.1 开关电源的定义

变换电能的电源,按其构成和工作原理可分为线性电源、相控电源和开关电源 3 种。

在开关电源出现之前,线性电源已经应用了很长时间且获得了大量应用。典型线性电源电路如图 1.1 所示,电路中的关键元件是调整三极管 T。工作时,将输出电压检测值与给定电压(或参考电压)进行比较,用其误差对调整三极管 T 的基极电流进行负反馈控制。这样,当输入电压发生变化或负载变化引起输出电压变化时,就可以通过改变调整三极管 T 管压降来使输出电压稳定。由于调整三极管 T 必须工作在线性放大状态,并保持一定的管压降才能发挥足够的调节、稳定作用,这类电源才被称为线性稳压电源(简称线性电源)。

由于大部分直流电能都是由交流电网得到的,因此在图 1.1 中设置了变压器,其作用有两个:一是通过对变压器变比的合理设计,确保调整三极管 T 工作在放大状态,并使调整三极管 T 的管压降工作在一个适当的范围;另一个作用是使输出直流电压与交流输入之间实现电气隔离。

人们在使用过程中发现,这类线性电源虽然可以满足所需直流电压大小和供电质量

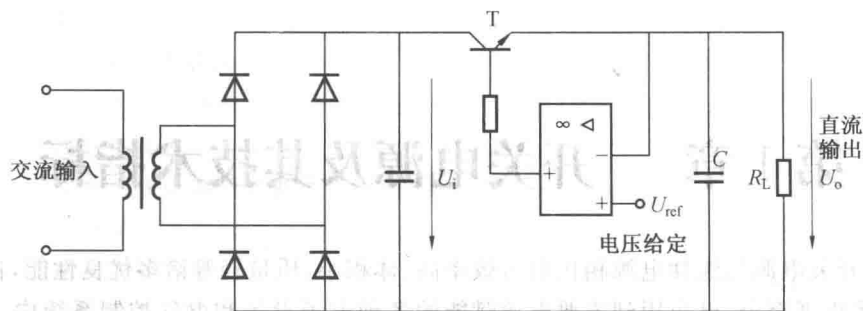


图 1.1 线性电源电路

要求(如纹波、精度),但有以下缺点:①调整三极管 T 工作在线性放大状态,损耗很大,导致效率很低;②由交流电网供电时存在一个工频变压器,导致电源体积、质量大;③电路自身只能进行降压,不能升压;④因效率问题,很难在要求输出电流大于 5 A 的场合使用。

随着技术的发展与进步,人们对各种电子设备小型化、轻量化的要求也越来越严格。为了克服线性电源的这些缺点,产生了开关电源。与线性电源相比,开关电源中的调整器件均工作在“开关”状态,而非线性放大状态,所以其损耗很小,电源效率得以提高;开关电源中起电气隔离和电压变换作用的变压器是高频变压器(其工作频率一般都大于20 kHz,相比工频变压器其体积、质量都大大减小),而非工频变压器,同时因工作频率高、输入输出滤波器的体积也大为减小,这些都使得开关电源的体积得以大为缩小,质量也大大减轻。

虽然相控电源中的调整器件和开关电源中的一样,也是工作在开关状态,但其工作频率是工频,不是高频。相控电源相比开关电源,最大优点是电路简单、控制方便;缺点是直流相控电源输出电压纹波频率仅是工频的几倍(单相全控桥为 2 倍,三相全控桥为 6 倍),需要较大的滤波器才能有较好的滤波效果。另外,由于相控电源的工作频率低,对控制的响应速度也比开关电源慢。

按之前的习惯,开关电源专指功率调整器件工作在高频开关状态下的直流电源。因此,开关电源也常被称为高频开关电源,相控电源显然不应该包括在开关电源的范围内。可见,开关电源也可以看作是高频直流开关电源的简称,其中“高频”排除了相控电源,“直流”排除了交流电源(如 UPS)。

就电源而言,除输出直流电能的电源(即直流电源)外,还有一大类输出交流电能的电源(即交流电源)。例如,UPS 电源提供的是恒频恒压的交流电能,变频器提供的是变频变压的交流电能,其中的功率调整器件也都工作在高频开关状态,但它们均不属于传统意义上定义的“开关电源”。

综上所述,开关电源是作为线性稳压电源的一种替代产品而出现的,开关电源这一称谓也是相对于线性稳压电源而产生的。顾名思义,开关电源就是电路中的功率调整器件工作在高频开关状态的电源。这样一来,如果把4类基本电力电子电路(AC/DC电路、DC/AC电路、AC/AC电路、DC/DC电路)都看成电源电路,则所有的电力电子电路也都可以看成开关电源电路。但是在实际应用中开关电源所涵盖的范围比这个范围要小得

多,因为传统意义上定义的开关电源需要同时具备以下3个条件:①开关,电路中的功率调整器件工作在开关状态而不是线性状态;②高频,电路中的功率调整器件工作在高频而不是接近工频的低频;③直流,电源的输出是直流而不是交流。

随着电力电子技术的发展和大量应用,人们对开关电源的定义也有了新的认识,已不局限于传统意义上对开关电源的定义,由此产生了一种新的定义方式,即:凡是采用半导体功率开关器件作为开关管,通过对开关管的高频开通与关断控制,将一种电能形态转换成另一种电能形态的装置,称为开关变换器;以开关变换器为主要组成部分,用闭环自动控制来稳定输出(如输出电压或输出电流等),并在电路中加入保护环节的电源,就称为开关电源(Switching Power Supply)。可见,这样定义开关电源后,它也包含输出交流电能的电源,比如前面提到的UPS、变频器等。

1.1.2 开关电源的结构形式

由前面的开关电源定义可知,开关电源通常是指功率调整器件工作在开关状态的AC/DC或DC/DC变换器、有负反馈闭环控制和必要的保护环节,且满足负载使用要求的电源系统。其结构形式可以用如图1.2所示的开关电源基本构成框图来说明。

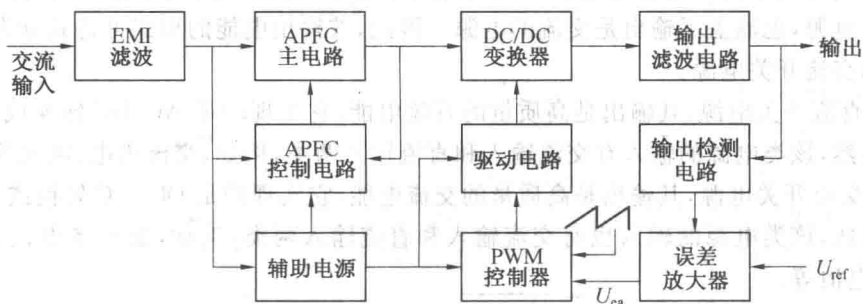


图 1.2 开关电源基本构成框图

由图1.2所示的高频开关电源框图可知,开关电源主要是由输入侧的APFC电路、DC/DC变换器、检测与控制电路和保护电路等部分组成的。

(1) 输入侧的APFC电路,其作用是将市电输入的交流电压转换成纹波较小的直流电压(如果开关电源的输入是直流电,则不需要此环节),同时利用该环节对输入交流电流进行控制、使其跟踪输入电压,以提高网侧功率因数、减少谐波污染。

(2) DC/DC变换器,是开关电源的主要组成部分,也是开关电源的核心,其作用是将市电输入经过APFC电路输出的直流电压,进行PWM控制和DC/DC转换,得到另一种数值的直流稳定电压输出。实际上,各种PWM DC/DC变换器都可以作为高频开关电源主电路的主要组成部分。在设计时可以根据不同的使用场合和具体使用要求,选用合适的PWM DC/DC变换器作为开关电源的主要组成部分或转换核心。

(3) 检测与控制电路,其作用是通过输出检测电路检测输出电压的值,并通过误差放大器与参考电压 U_{ref} 进行比较,得到误差值 u_c ,将 u_c 通过脉宽调制器(即PWM控制器)与锯齿波电压进行比较,得到PWM矩形波脉冲列,此脉冲列通过驱动电路对DC/DC变换器进行PWM控制,进而达到稳定输出电压的目的(图1.2中以采用电压型PWM控制技

术为例)。

(4) 开关电源的保护电路(在图 1.2 中未画出来),其作用是保护开关电源安全稳定地工作。

另外,如果考虑电磁干扰(EMI),可以在开关电源输入端加入 EMI 滤波器。当然,不同用途的开关电源的构成会有所不同。比如,在小功率电源中,输入部分没有 APFC 环节,仅是整流加电容滤波;而装在其他印制电路板上的 DC/DC 电源,只有 DC/DC 变换一级,甚至没有独立的辅助电源和外壳。

1.2 开关电源分类

开关电源的构成方式、控制方法有多种,导致其分类方法也有很多种,下面介绍几种分类方法供读者参考。

1. 按输出电能形式分类

随着电力电子技术与电力电子器件的发展与进步,现代开关电源已不仅局限于输出是直流的电源,也涵盖了输出是交流的电源。因此,按输出电能的形式可将其分为直流开关电源和交流开关电源。

(1) 直流开关电源,其输出是高质量的直流电能,它实现的是 AC/DC 转换或 DC/DC 转换。显然,该类电源的输入有交流输入和直流输入两类,例如,交流市电、电池等。

(2) 交流开关电源,其输出是高质量的交流电能,它实现的是 DC/AC 转换或 AC/AC 转换。显然,该类电源的输入也有交流输入和直流输入两类,例如,交流市电、直流发电机、光伏电池等。

2. 按驱动方式分类

(1) 自激式开关电源,它是借助于变换器自身的正反馈控制信号,实现开关管的自持周期性开关。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(也称 RCC 变换器)。

(2) 他激式开关电源,电源内部的开关控制信号是由另外设置的控制电路产生的,如图 1.2 中所示的电源。

3. 按输入输出是否隔离分类

(1) 隔离式开关电源,是利用高频变压器将变换器的输入侧与输出侧隔离的。这类电源选用的变换器结构主要有单端正激式变换器、单端反激式变换器、推挽变换器、半桥式变换器和全桥式变换器。

(2) 非隔离式开关电源,在电气上输入与输出不隔离,输入与输出共用一个公共端。这种变换器结构主要有 Buck 变换器、Boost 变换器、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。

4. 按功率开关管关断和开通条件分类

(1) 开关管是硬开关的开关电源,功率开关管是在承受电压或电流应力的情况下接

通或关断的,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、滤波等措施,才能满足高精度、高性能用电设备的要求。

(2) 开关管是软开关的开关电源,功率开关管是在不承受电压或电流应力的情况下接通或关断的。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和小型化。

5. 按能量传输方式分类

(1) 能量单向传输的电源,电能只能从电源输入侧传递到负载侧。

(2) 能量双向传输的电源,为了提高电能利用效率、节约能源,在一些应用领域(如电动汽车、电能存储等)要求电源具有能量双向传输功能,既可以从电源的输入侧向负载侧(输出侧)传输功率,又可以从负载侧向电源的输入侧传输功率。

6. 按调制方式分类

按开关电源中的转换核心——DC/DC变换器的调制方式,可以将开关电源分为脉冲宽度调制方式和脉冲频率调制方式两类。

(1) 脉冲宽度调制方式,简称脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)。其主要特点是固定开关频率,通过改变脉冲宽度来调节占空比,进而实现稳定输出的目的,其核心是脉宽调制器。开关周期的固定为设计滤波电路提供了方便。它的缺点是受功率开关最小导通时间的限制,对输出电压不能进行宽范围调节;此外,输出端一般要接假负载(亦称死负载),以防止空载时输出电压升高。目前,大多数开关电源采用 PWM 调制方式。

(2) 脉冲频率调制方式,简称脉频调制(Pulse Frequency Modulation, PFM)。其特点是将脉冲宽度固定,通过改变开关频率来调节占空比,进而实现稳定输出的目的,其核心是脉频调制器。在电路设计上要用固定脉宽发生器来代替脉宽调制器中的锯齿波发生器,并利用电压/频率变换器(例如压控振荡器 VCO)改变频率。采用 PFM 调制方式的开关电源,其输出电压调节范围很宽,输出端可不接假负载。但由于是变频调节方式,其输入输出滤波器设计困难。

有时,也可以把 PWM 调制方式和 PFM 调制方式组合起来使用,以满足对开关电源的某些特殊要求,如较宽的输出电压调节范围、降低开关电源的轻载损耗或提高待机效率等。

1.3 开关电源的主要技术指标

开关电源技术指标明确了待设计电源的实际使用要求,所以开关电源的设计工作应从深入分析和理解待设计电源的技术指标开始,而且设计工作也应以满足技术指标的要求为目的。

从使用者的角度看,若要合理选用或使用一台开关电源也需要正确理解开关电源的各项技术指标。

1.3.1 输入侧技术指标

开关电源输入侧的技术指标主要包括输入电压、输入频率、输入相数、输入电流、启动冲击电流、输入功率因数和谐波等参数。

(1) 输入电压。国内应用的民用交流电源电压单相为 220 V、三相为 380 V；出口到国外的电源需要参照出口国电压标准，例如：美国的为 110 V、欧洲为 220 ~ 240 V、日本为 100 V 及 200 V 等。目前便携式设备的开关电源流行采用国际通用电压范围，即单相交流 85 ~ 265 V，这一范围覆盖了全球各种民用电源标准所限定的电压，但对电源的设计提出了较高的要求。

输入电压为直流时情况较复杂，一般在 24 ~ 600 V 范围内。当然，个别场合也有低于 24 V 和高于 600 V 的时候，比如有的变频器中的直流母线电压超过 1 000 V，以此为输入的辅助电源的输入电压也将超过 1 000 V。

输入电压这一指标通常包含额定值和变化范围两方面内容，输入电压的变化范围一般为 $\pm 10\%$ 。输入电压范围的下限影响变压器的变比，而上限决定了主电路元器件的电压等级。如果要求输入电压变化范围过宽，就必须在设计时留较大裕量而造成浪费，因此输入电压的变化范围应在满足实际要求的前提下尽量小，而不是越大越好。

(2) 输入频率。我国民用和工业用电的频率均为 50 Hz（有的国家电网频率为 60 Hz），其变化范围一般为 48 ~ 63 Hz，对开关电源的特性影响不大。航空及船舶用的电源经常采用交流 400 Hz 输入（这时的输入电压通常为单相或三相 115 V），整流后的脉动频率远高于工频，因此整流电路所连接的滤波电容可以比频率 50 Hz 时减小很多。

(3) 输入相数。三相输入的情况下，整流后直流电压大约是单相输入时的 1.7 倍。当开关电源的功率小于 5 kW 时，可以选单相输入，以降低主电路器件的电压等级，从而可以降低成本；当功率大于 5 kW 时应选三相输入，以避免引起电网三相间的不平衡，同时也可以减小主电路中的电流以降低损耗。

当然，有些特定场合使用的电源，要根据现场的实际供电情况来决定电源是由三相供电还是单相供电。

(4) 输入电流。通常包含额定输入电流和最大输入电流两项，是输入开关、接线端子、熔断器和整流桥等元器件的设计依据。

额定输入电流是指输入电压和输出电压、输出电流均为额定值时对应的输出电流，最大输入电流是指在输入电压下限和输出电压上限、输出电流上限时对应的输出电流。

三相输入时，各相电流有时会发生失衡现象，应取平均值。

(5) 启动冲击电流。指输入电压按规定时间间隔接通或断开时，输入电流达到稳定状态前所通过的最大瞬时电流。

为防止冲击电流给电源输入回路带来的不利影响，在电源输入回路中均要设置启动冲击电流抑制电路。

(6) 输入功率因数和谐波。目前，对保护电网环境、降低谐波污染的要求越来越高，许多国家和地区都已出台相应的标准（如 IEC61000-3 系列），对用电装置的输入谐波电流和功率因数做出较严格的限制，因此输入谐波电流和功率因数成为开关电源的重要

指标。

目前,单相有源功率因数校正(APFC)技术已经基本成熟,附加的成本也较低,可以很容易地使输入功率因数达到0.99以上,输入总谐波电流小于5%。三相APFC技术尚不尽人意,如果功率因数要求很高,如高于0.99,则需要采用复杂的6开关PWM整流电路,而且其成本很可能会高于后级DC/DC变换器的成本;如果不能允许成本增加很多,则只能采用单开关三相PFC技术,其功率因数通常只能达到0.95左右,而且具体电路还存在很多问题,或采用无源PFC技术,通常其功率因数只能达到0.9左右。这是制定指标时必须考虑的。

关于功率因数和谐波方面的技术指标及有关的功率因数校正电路,可以参见第5章。

1.3.2 输出侧技术指标

开关电源输出侧的技术指标主要有输出电压、输出电流、稳压(稳流)精度、纹波等参数。

(1) 输出电压。通常给出额定值和调节范围两项内容。输出电压的调节范围是指在保证电压稳定精度条件下,由外部可能调整的输出电压范围,一般为输出电压的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$ (大多数输出可调电源的输出电压调节范围都是根据用户的实际使用要求而设计的),条件是在输入电压的下限时能输出电压的最大值,在输入电压的上限时能输出电压的最小值。

由于输出电压的上限关系到变压器设计中变压器变比的计算,过高的上限要求会导致过大的设计裕量和额定点特性变差,因此在满足实际要求的前提下,上限应尽量靠近额定点。相比之下,下限的限制比较宽松。

(2) 输出电流。通常给出额定值和一定条件下的过载倍数,有稳流要求的电源还会指定调节范围。额定值是指电源输出端供给负载的最大平均电流,有的电源不允许空载,此时应给出电流下限。

(3) 稳压(稳流)精度。通常以正负误差带的形式给出。影响电源稳压(稳流)精度的因素有很多,主要有输入电压变化、负载变化、环境温度变化及器件老化等因素。

通常该项指标可以分成3个项目考核:①输入电压调整率;②负载调整率;③温度系数。输入电压调整率是指开关电源在输入电压变化、负载电流不变时,提供其稳定输出电压的能力;负载调整率是指开关电源在输入电压不变、负载电流变化时,提供其稳定输出电压的能力;当环境温度变化时,输出电压(或输出电流)也会发生变化,这是由于电子元器件的温度特性造成的。温度每变化一度,输出电压(或输出电流)的相对变化量称为温度系数。

同精度密切相关的因素有基准源精度、检测元件精度、控制电路中运算放大器精度等,设计或选用开关电源时,满足实际使用要求即可。过高的精度要求,不仅增加设计难度,还会影响电源成本。

(4) 纹波。开关电源的输出电压纹波成分较为复杂,典型的输出电压纹波波形如图1.3所示,通常按频带可以分为3类:①高频噪声,即图1.3中频率远高于开关频率 f_s 的

尖刺;② 开关频率纹波,指开关频率 f_s 附近的频率成分,即图 1.3 中锯齿状成分;③ 低频纹波,指频率低于 f_s 的成分,即低频波动,如图 1.3 所示。

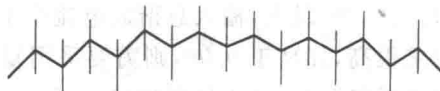


图 1.3 输出纹波示意图

对纹波有多种量化方法,常用的有:

① 纹波系数:取输出电压中交流成分总有效值与直流成分的比值定义为纹波系数。这是最常用的量化方法,但不能反映幅值很高、有效值却很小的尖峰噪声的含量及其影响。而且由于纹波包含的频率成分从 1 Hz 以下直到数十 MHz,频带极宽,用常规仪表很难精确计量其总有效值。

② 峰—峰电压值:该方法计量了纹波电压的峰—峰值,可以反映出幅值很高、有效值却很小的尖峰噪声的含量,但不能反映纹波有效值的大小,不够全面。

③ 按 3 种频率成分分别计量幅值:方法最为直观、详细,也容易用示波器直接测量。

(5) 漏电流。

流经输入侧地线的电流,在开关电源中主要是通过静噪滤波器(或称 EMI 滤波器)的旁路电容泄漏的电流。

为防止发生触电危险,目前包括 IEC 在内的国际安全标准中,均针对设备等级以及使用数量等规定了适当的标准,一般所规定的泄漏值是在 0.5 ~ 1 mA。当然,应用于不同领域的开关电源,对这一指标的要求也不一样。例如,对人体容易接触到的医疗电子设备和便携式电子设备中使用的电源的要求就更高一些,设计时要注意符合相关标准的要求。

(6) 效率。效率是开关电源的重要指标,它通常定义为

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中, P_{in} 为输入有功功率; P_o 为输出功率。

通常给出在额定输入电压和额定输出电压、额定输出电流条件下的效率。

对于开关电源来说,提高效率就意味着损耗功率的下降,从而可降低电源温升,提高可靠性。同时,节能效果也很明显,所以应尽量提高电源效率。开关电源中产生的各种损耗可以分为以下 3 种:

① 与开关频率有关的损耗,包括开关器件的开关损耗、变压器的铁损、电感的铁损以及吸收电路的损耗。

② 电路中的通态损耗,包括开关器件的导通损耗、变压器的铜损、电感的铜损以及线路损耗。

③ 其他损耗,包括控制电路损耗、冷却系统的损耗等。

在这众多的损耗中,有些损耗是较难大幅度降低的,如通态损耗;而有些损耗则可以通过采用软开关技术或无损吸收技术,使其大幅度降低,如开关器件的开关损耗和吸收电路的损耗。

一般来说,输出电压较高的电源效率高于输出电压较低的电源,这同电源输出侧整流二极管的通态压降与输出电压的比值相关。通常输出电压较高($> 100\text{ V}$)的电源效率可达 $90\% \sim 95\%$ 。

1.3.3 电源的输出特性

电源的输出特性同其应用领域的工艺要求有关,不同领域对电源输出特性的要求差别很大,设计中必须根据对电源输出特性的实际要求来确定主电路和控制电路的形式。

1. 恒压源的特性

理想恒压源是一种电源内阻 R_0 为零、端电压保持规定值,且与负载大小及方向无关的电压源;实际的恒压源是有一定的内阻 R_0 及输出功率有限的电压源,其外特性如图 1.4 所示。

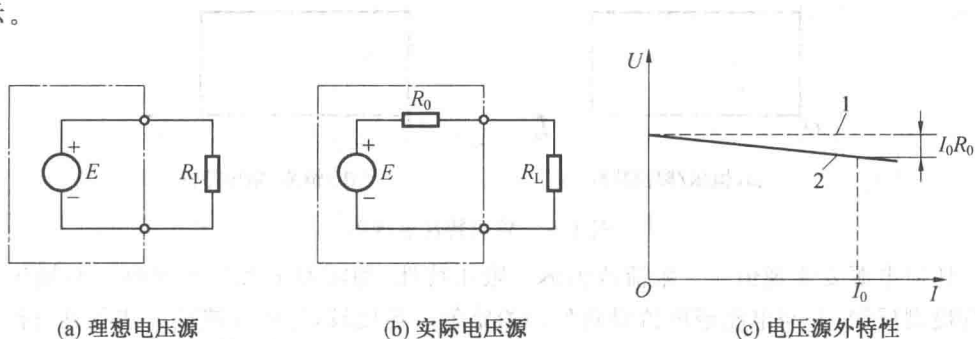


图 1.4 电压源及其外特性

理想恒压源的外特性是一条与横坐标电流轴平行的直线,实际的恒压源外特性是一条向电流轴倾斜的直线,如图 1.4(c) 所示。

2. 恒流源的特性

理想的恒流源是一种内阻为无穷大、输出电流始终保持在规定值,且与端电压的大小和极性无关的电流源;实际的电流源是存在内阻 R_0 和功率都有限的电流源,其外特性如图 1.5(c) 所示。

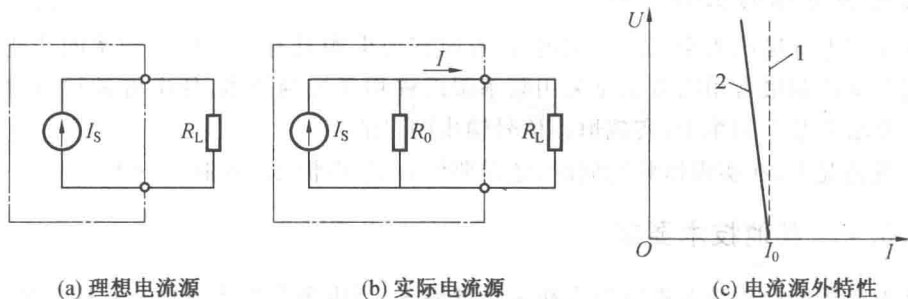


图 1.5 电流源及其外特性

理想恒流源的外特性是一条垂直于横坐标电流轴的直线,实际恒流源因内阻 R_0 不可能无穷大,其外特性是一条向电压轴倾斜的直线,如图 1.5(c) 所示。

3. 开关电源的恒压 / 限流、恒流 / 限压特性

恒压 / 限流的输出特性要求,如图 1.6(a) 所示。具备这种特性的电源在负载电流未达到限流值时工作在恒压状态,随着负载的加重,输出电流达到限流值,输出电压开始下降,电源处于恒流工作状态。

恒流 / 限压的输出特性要求,如图 1.6(b) 所示。具备这种特性的电源在输出电压未达到限压值时工作在恒流状态,随着负载的加重,输出电压达到限定值,输出电流开始下降,电源处于恒压工作状态。

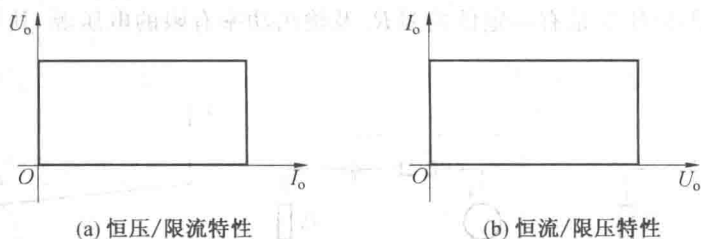


图 1.6 输出特性示意图

任何电源要实现恒压 / 限流或恒流 / 限压特性,均需对电源的输出电压和输出电流进行检测反馈,并与电压或电流设置值即给定值进行比较,经负反馈放大调节进行控制。其中,线性串联稳压电源是通过调节调整管的管压降来实现的,开关电源则是通过调节 PWM 变换器的驱动脉宽(或占空比)来实现控制的。

4. 开关电源的恒功率功能

开关电源最常用的是恒压或恒流功能,在某些具体应用场合,有时也需要开关电源具有恒功率输出功能。

电源的恒功率控制通常采用的方法是对电源的输出电压和输出电流进行检测取样,经乘法器变成电压、电流的乘积信号,再与功率基准进行比较,经调节器控制变换器的工作状态,因控制信号含有电压、电流乘积(即功率)的信息,可达到恒功率控制的目的。

5. 开关电源的恒频功能

在开关电源输出为交流的应用场合,有时需要电源具有恒定输出频率的功能。电源的恒定频率控制最常用的方法是采用频率跟踪锁相环控制技术,使电源的输出频率锁定在规定要求的基准频率上,实现恒频信号输出的目的。

一般情况下,在实现恒频的同时,还需要恒幅值(即恒压)控制。

1.3.4 其他技术要求

开关电源的电磁兼容性应符合相关标准要求,当由多个电源模块并联构成系统时,应有均流偏差要求(为满足此要求,需要在电源系统中采取必要的均流措施);当远距离操作时,用计算机可实现遥控、遥测、遥信等功能。

开关电源的电气绝缘是安全指标要求中的重要内容,出厂的开关电源必须经过电气