

脉宽调制变换器型稳压电源

徐德高 金 刚 编著

科学出版社

脉宽调制变换器型稳压电源

徐德高 金 刚 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书比较系统地阐述脉宽调制变换器型稳压电源的工作原理和设计计算方法。内容包括功率转换电路的型式和特点,晶体管关断时集电极尖峰电压的分析和计算,防止高频变压器饱和的分析和设计计算,输入输出滤波电路参数的实用计算方法,控制电路、驱动电路以及保护电路、电流变压器的设计计算,噪声及其抑制,并联运行技术以及备用可维修并联运行系统可靠性分析等。主要章节都附有计算实例,以供读者参考。

本书可供从事稳压电源设计、生产或维护的工程技术人员阅读或作为教材使用,也可供高等院校有关专业的教师或高年级学生参考。

脉宽调制变换器型稳压电源

徐德高 金 刚 编著

责任编辑 张建荣

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 6 月 第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1983 年 6 月 第一次印刷	印张: 14 3/8 插页: 3
印数: 0001—7,800	字数: 377,000

统一书号: 15031·499

本社书号: 3101·15-7

定价: 2.85 元

前 言

近年来,随着电子设备集成电路化的进展,直流稳压电源与整机在小型化、效率以及可靠性方面的矛盾日益显露,从而导致人们的深切关注。无工频变压器开关电源具有体积小、重量轻、效率高种种优点而在七十年代一跃成为当代电源的主流。

这类新颖稳压电源较之常规电源要复杂得多,它的一套分析设计方法和以往人们所熟知的内容也颇不相同,而我国电源专业制造厂屈指可数,大量的电源研制大都在电子设备的研制、甚至是使用单位中进行,专职的或兼职的电源工作者数量多而分散,又难以获得系统的资料,想来便是这类新颖电源在我国出现虽已多年但仍不普及的一个重要原因。为此,将我们多年来在研究实践中逐渐形成的对一些问题的分析设计方法加以整理并适当借鉴国内外有关论著使之充实而成本书。

在本书编著过程中,考虑到我国电源工作者的特点,在系统地阐述这类新颖电源主回路、控制回路以及并联运行技术的型式、特点、工作原理的同时,从实用角度出发,尽可能地介绍一些工程设计、分析、计算方法,并举例详尽地列出计算过程;根据国产元器件的现状,侧重于从可靠性角度对电路进行分析和设计也是本书特点之一;虽然并联运行已属于直流电源供电系统的范畴,但备用可维修并联运行方式无疑是补足这类电源可靠性的一种行之有效的手段,因而也作为重要内容列入;全书始终贯穿着一个经过较大批量生产和多年实际使用的某计算机电源例子并在第九章总成,以使读者建立较深的印象。

本书承清华大学张乃国同志和华北计算技术研究所何志高同志进行了细致的审阅,何志高同志提供并撰写了第八章部分内容,张乃国同志提供了多种资料,参与部分内容审阅的还有我所的方

资端同志,此外,庞大伟、唐希杰等同志也提供了种种帮助与支持.作者借此机会向他们以及曾给予或表示过鼓励与支持的同志们表示衷心的感谢.

由于水平的限制和时间的匆促,不妥之处谨希读者指正.

作者

于中国科学院计算技术研究所

一九八一年

目 录

第一章 绪论.....	1
第二章 无工频变压器开关电源的工作原理及其特点.....	8
§ 2-1 无工频变压器开关电源的类型.....	9
§ 2-1-1 电压调整部件+电压变换器型式.....	9
§ 2-1-2 电压变换器+电压调整部件型式.....	9
§ 2-1-3 控制变换器型式.....	10
§ 2-2 时间比率控制稳压原理和特点.....	11
§ 2-2-1 时间比率控制稳压原理.....	11
§ 2-2-2 TRC 控制方式和特点	13
§ 2-3 TRC 控制变换器型无工频变压器开关电源的工作原理和 特点	14
§ 2-3-1 工作原理.....	14
§ 2-3-2 PWM 型稳压电源的特点	18
第三章 功率转换电路.....	24
§ 3-1 功率转换电路的型式及其特点.....	25
§ 3-1-1 推挽式功率转换电路.....	25
§ 3-1-2 全桥式功率转换电路.....	26
§ 3-1-3 半桥式功率转换电路.....	28
§ 3-1-4 综合比较.....	29
§ 3-2 功率转换电路的不平衡问题.....	30
§ 3-2-1 全桥、推挽式电路的不平衡问题	30
§ 3-2-2 半桥式电路抗不平衡能力的分析.....	32
§ 3-3 PWM 型稳压电源用高压开关管	40
§ 3-3-1 开关特性	41
§ 3-3-2 高压开关管的功率损耗和电路对它特性的要求.....	42
§ 3-3-3 存储时间 t_s	49
§ 3-3-4 耐压.....	53

§ 3-3-5 二次击穿和安全工作区	55
§ 3-3-6 高压开关管的特性参数及其实际使用	62
§ 3-4 高压开关管的防护	67
§ 3-4-1 缩短存储时间	67
§ 3-4-2 防止“共同通导”	69
§ 3-4-3 降低工作温度	70
§ 3-4-4 一次击穿和二次击穿的防护	73
§ 3-4-5 其它防护措施	77
§ 3-5 高压开关管关断时集电极尖峰电压的数学分析和计算	78
§ 3-5-1 高压开关管的开关工作过程	78
§ 3-5-2 关断过程尖峰电压的数学描述	81
§ 3-5-3 尖峰电压和电路各参数的关系	90
§ 3-6 高频变压器	99
§ 3-6-1 磁心材料和结构	100
§ 3-6-2 高频变压器瞬态饱和及其防止	106
§ 3-6-3 绕组计算	110
§ 3-6-4 绕组的绕制	118
§ 3-7 单端变换器	127
§ 3-7-1 单端反激变换器	127
§ 3-7-2 单端正激变换器	138
§ 3-7-3 单端变换器输出功率的叠加	143
§ 3-7-4 单端变换器的设计	148
第四章 输入整流滤波电路	153
§ 4-1 电容输入式滤波电路计算图表	153
§ 4-2 输出保持能力	159
§ 4-3 合闸浪涌电流的抑制	163
第五章 输出整流滤波电路	168
§ 5-1 输出整流滤波电路的工作过程	168
§ 5-1-1 全波整流滤波电路工作过程	168
§ 5-1-2 单端正激变换器整流滤波电路工作过程	172
§ 5-2 PWM 型稳压电源用开关整流二极管	174
§ 5-2-1 整流二极管的损耗	174
§ 5-2-2 常用的开关整流二极管	175

§ 5-3 输出滤波电路的设计	179
§ 5-3-1 输出滤波电感 L	180
§ 5-3-2 输出滤波电容 C	183
§ 5-3-3 PWM 型稳压电源用高频电解电容器	191
第六章 控制电路	195
§ 6-1 控制电路的功能和结构	195
§ 6-1-1 控制电路的功能	195
§ 6-1-2 控制电路的结构型式	197
§ 6-2 时钟振荡器	198
§ 6-2-1 劳耶尔振荡器	198
§ 6-2-2 多谐振荡器	204
§ 6-2-3 单结晶体管振荡器	205
§ 6-3 脉宽调制器	207
§ 6-3-1 时间常数型脉宽可变电路	208
§ 6-3-2 模拟电压-锯齿波比较型 V/W 电路	218
§ 6-3-3 V/F 转换电路	219
§ 6-4 分频器	226
§ 6-5 软启动电路	229
§ 6-6 控制电路实例	231
§ 6-7 保护电路	237
§ 6-7-1 过流保护电路的型式及其特点	238
§ 6-7-2 保护电流的取样和电流变压器的计算	242
§ 6-7-3 过电压保护电路	247
§ 6-7-4 保护电路举例	249
§ 6-8 辅助电源	260
§ 6-9 控制电路集成化	263
第七章 驱动电路	270
§ 7-1 “恒流驱动”电路	270
§ 7-1-1 最佳正向基极驱动电流波形	271
§ 7-1-2 正向基极驱动电路的设计	273
§ 7-2 “比例电流驱动”电路	275
§ 7-3 反向驱动电路	278
§ 7-3-1 无偏驱动电路	279

§ 7-3-2 单极性脉冲变压器驱动电路	280
§ 7-3-3 电容储能式驱动电路	282
§ 7-3-4 固定反向偏置驱动电路	282
§ 7-4 驱动电路例	290
第八章 噪声及其抑制	297
§ 8-1 噪声的类型和传递方式	297
§ 8-1-1 噪声类型	297
§ 8-1-2 噪声的传递方式	299
§ 8-2 噪声的抑制	300
§ 8-2-1 消除或抑制噪声源	300
§ 8-2-2 抑制耦合通道	302
第九章 PWM 型稳压电源设计实例	311
§ 9-1 设计要求	311
§ 9-2 电路设计	312
§ 9-2-1 设计思想	312
§ 9-2-2 主回路设计	313
§ 9-2-3 驱动电路设计	330
§ 9-2-4 控制电路设计	332
§ 9-3 技术性能	341
§ 9-3-1 电路各主要部分波形	341
§ 9-3-2 技术性能	341
§ 9-4 电路及参数表	349
第十章 PWM 型稳压电源的并联运行	352
§ 10-1 PWM 型稳压电源并联运行的必要性	353
§ 10-1-1 PWM 型稳压电源本身的需要	353
§ 10-1-2 “分区供电方式”的弊病	354
§ 10-1-3 提高电源设备的使用率	355
§ 10-2 并联运行的方式及其特点	358
§ 10-2-1 恒压-恒流源工作方式	358
§ 10-2-2 集中控制方式	360
§ 10-2-3 限流工作方式	361
§ 10-2-4 各种并联运行方式的复杂性	362
§ 10-3 并联供电系统可靠性	363

§ 10-3-1 可靠性工程的数学描述	363
§ 10-3-2 系统可靠性的分析和计算	366
§ 10-3-3 并联供电方式系统可靠性比较	379
§ 10-4 并联运行的实施方法	382
§ 10-4-1 集中控制方式并联运行的实施	382
§ 10-4-2 限流式并联运行的实施	383
§ 10-5 并联运行实例	386
§ 10-5-1 PWM 型稳压电源电路及其并联运行系统	386
§ 10-5-2 系统可靠性实例计算	394
附录 10-1	398
附录 10-2	400
附录	406
参考文献	448

第一章 绪 论

被人们誉为“20kHz 电源技术革命”的时间比率控制变换器型稳压电源是指由交流电网直接整流、以高频变压器取代工频变压器、采用脉冲调制技术的直流-直流变换器型稳压电源。随着电子设备的集成电路化,这种新颖稳压电源在七十年代受到人们的普遍重视,从而得到迅速的发展和广泛的应用。

从广义角度看,它也是一种开关型稳压电源,在欧美,尤其是日本,通常就称它为开关电源(Switching Power Supply, スイッチング・レギュレータ),也有人根据主回路中省掉了工频变压器这一典型特征而称之为无工频变压器开关电源。

开关型稳压电源从原理上讲并不是什么新鲜东西,它可以追溯到三十年代的磁放大器,六十年代初颇为盛行的晶闸管相位控制整流电源也是一种开关型电源。由于它们都有受电网频率限制的特性,因而在电子计算机等电子设备规模尚不大的分立元件时代,电路非常简单、使用元器件数量少、工作可靠而技术性能又十分优良的晶体管串联线性调整型稳压电源成了直流稳压电源的中心,这种局面一直维持到六十年代中期。

这种常规电源虽然电特性优良,但它的根本弱点是功率晶体管串联在负载回路里,而且工作在线性区域,输出电压的调节与稳定借助于功率晶体管上电压降落的调整来实现,因而对于输出低电压大电流的场合,效率非常低,功率晶体管的发热和散热便成了问题,这就必然导致体积的增大。随着半导体技术的进步,电子设备开始从分立元件进入了集成电路时代,体积日益减小,装机密度不断提高,规模容量逐渐增大,在以电子计算机为代表的电子设备中继续使用常规电源,不仅因它的单台容量小而使用数量越来越多,可靠性相应地下降,而且占机体积也显得越来越大,这种常规

电源难以满足形势发展需要的趋势已逐渐显露，人们不得不回过头来再次注目开关调整方式。

六十年代初 McMurray 改进了晶闸管并联逆变器，Morgan 研制成晶闸管串联开关调整器，克服了磁放大器和晶闸管相控整流依存于电网频率的缺点，以较高的速度（取决于晶闸管本身的开关速度，当时约 1kHz 左右）进行直流电压的转换；由锗晶体管制成的串联开关型稳压电源相继出现，虽然晶体管的输出功率及耐压均比不上晶闸管，然而，由于开关速度上的优势以及控制电路的简单而具有相当强的竞争能力。上述开关型电源由于功率开关元件工作在开关状态，损耗小、效率高，体积重量较之常规电源均有所改善，尤其是硅功率晶体管的出现，使其在大电流领域显示出更为明显的优越性，常规电源被逐步取代。六十年代中期开始，我国大中型电子计算机纷纷转而采用开关型电源或是带中频机组的晶闸管相控整流电源，标志着串联线性电源为主导时期的结束和开关调整时代的到来。

虽然这种型式的转换显示出直流稳压电源取得了长足的进步，但是，还是不能适应半导体事业日新月异的发展。自 1959 年始，集成电路一个组件内所封装的元件数几乎每隔一年要翻一翻，到了 1976 年，一个组件内的元件数已达 26 万之巨，这种趋势仍在继续。其结果导致电子计算机等电子设备功耗密度的急剧增加、规模容量的迅速扩大、功能的复杂和可靠性的大幅度提高，这就迫切要求直流稳压电源亦能相应地具有高可靠性以及诸如程序控制、电压通/断、远距离操作和信息保护等种种功能，尤其是由于集成电路标定电压的降低，意味着直流稳压电源必须在大大缩小了的体积内提供非常大的输出电流（例如数百安，甚至数千安），亦即电源亦应实现小型化才能维持恰当的占机体积比；同时，在能源颇为紧张的今天，电源的效率无疑将比以往任何时候都显得更为重要等等。总之，随着半导体技术的飞速发展，电子设备对直流稳压电源提出了一系列崭新的要求。

对于这些要求，常规电源早已无法满足；串联开关调整型电源

由于功率晶体管仍串联在负载回路里,而且仍使用工频变压器,这就限制了输出电流的增加和体积重量的根本缩减,它也不能适应形势发展的要求。如果说电路的集成化为电子设备带来了根本性收益的话,那么,直流稳压电源显然也必须有所突破,从而引发了一场 20kHz 的电源技术革命。这里值得指出的是早在五十年代后期出现的劳耶尔(Royer)振荡器,虽然由于当时锗功率晶体管的耐压不高而只限于低输入电压条件下使用,同时振荡器本身也不兼备稳定电压的能力,但是,毫无疑问,劳耶尔振荡器开辟了提高工作频率进行高效率转换实现电源小型化的途径。

为了去掉附加的电压调整元件使变换器本身兼备稳压功能,人们探索了各种各样的控制变换器,例如用一个独立变换器,一个辅助变换器,使后者跟踪前者的频率而又用 RC 网络获得一定相移的双变换器方式等;时间比率控制技术在变换器中的应用标志着控制变换器发展的一个极其重要的阶段,1962 年 Electronics 发表了用饱和磁心获得恒定脉宽、用多谐振荡器调节工作频率的控制变换器式卫星电源,这种输出 25W、频率为 10kHz 的新颖稳压电源,效率高达 80%,重仅 0.75 磅。除了航天方面的应用外,控制变换器在电子交换机中也得到了广泛使用,因为以 48V 等低直流电压供电的系统正适合硅功率晶体管当时的电压等级。六十年代后期控制变换器已经达到 5V100A 的输出功率,效率一般可达 60%,这就表明电路技术已经能够实现用高频变压器取代工频变压器,只是器件条件不允许罢了。

六十年代末三重扩散工艺的成功,大功率硅晶体管的耐压由外延平面型的 100—200V,一下子提高到 400—500V,从而实现了人们多年来的愿望。早期由于高耐压大功率晶体管的开关特性不佳,尤其是大功率整流二极管反向恢复时间较长(当时一般大容量整流元件都在 $3\mu\text{s}$ 以上),若变换频率为 10kHz,那么仅此一项将使效率降低 5% 以上,此外,1.2V 的正向整流压降在 5V 输出时也意味着效率损失 20%,所以,初期的控制变换器从体积、效率等各方面综合考虑,电路的工作频率只宜选在 1kHz 左右,效

率也仅能达到 60%。这样不仅妨碍了这类电源优越性的充分发挥,而且产生的噪音也令人烦恼,因此,仅仅是功率晶体管解决了耐压问题是远远不够的,它的开关特性以及主要配套元器件的特性必须迅速改善。但是,由于多年来电源的简单可靠、技术性能的优良,它们极易满足用户要求而长期为人们忽视,虽然电源技术随着时间的推移也有所前进,但和其它电子设备相比,在体积、重量、效率、价格、可靠性等方面的严重落后比比皆是,因而直到 1973 年人们还在继续呼吁 20kHz 的电源技术革命。这种不协调的状况

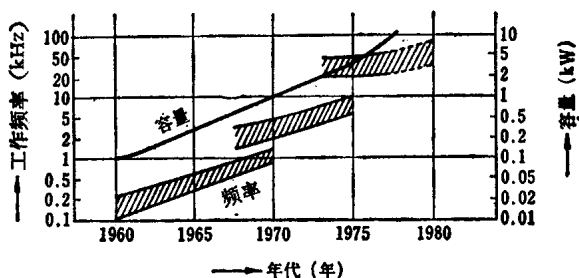


图 1-1 工作频率和容量随时间的演变 引自本多 進,“1 石式スイッチングレギュレータ”,電子科学,28 (3)93(1978)

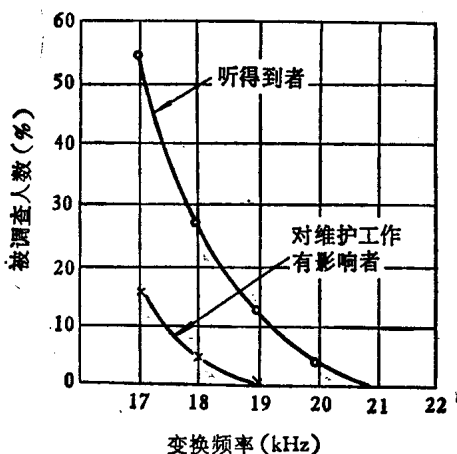


图 1-2 工作频率对操作人员的影响 引自鈴木 昇等,“PCM-400M 給電装置の実用化”,研究実用化報告,25(1)82 (1967)

直接影响现代日益复杂的电子设备整机的设计和性能。由此,原来默默无闻的电源近十年来成了国外许多杂志报道的一个重要内容,成了国际会议讨论的一个专题,受到人们的关心,从而导致脉冲调制变换器型稳压电源近十年来取得了显著的进步。尤其是大功率肖特基势垒二极管的出现(它有很低的正向压降——0.6V左右,短的反向恢复时间——200ns左右),使得效率大为提高,从而实现了20kHz高频化和小型化。图1-1是工作频率随时间逐步提高的概况,从1974年开始,有较长一段时间稳定在20kHz左右,这几乎成了国际上的标准工作频率。1976年日本电气通信研究所发表了一篇调查报告,对离电源1米处106名各种人员进行了调查,他们对频率引起噪声的反应如图1-2所示,当频率达到19kHz时,87%的人听不到,98%的人对作业没有影响,可见,应该选用20kHz作为最低的标准频率。

这种新颖电源具有体积小、重量轻的典型特点已为人们所公认,此外还有效率高、输出保持时间长而便于实现计算机信息保护等等与集成电路型电子设备的要求相适应的种种优点,但七十年代初期人们仍对它持怀疑态度的主要原因是它的电路复杂、元器件数量多以及输出端的尖峰噪声较大。几年来的实践证明,100mV_{p-p}的尖峰对数字电路没有妨碍,随着器件的进步和电路技术的提高,尖峰噪声正在逐渐减小;单片集成控制电路的研制成功,不仅使它的元器件使用数量大幅度减少,简化了设计生产,加速了系列化、标准化的进程,同时也大大提高了它的可靠性,据1978年国外报道,这类新颖电源的平均故障间隔时间已经提高到了10万小时以上,达到了常规电源的水平;此外,效率的提高在今天特别受到人们的关注和鼓励,同时,这也意味着运转费用的降低,据美国某公司报道,一台250W电源,效率由31.6%(指常规电源)提高到82%,每年可望减少费用160美元,显示出它经济方面的优越性。在价格方面,由于主要元器件价格的降低,它不仅在大功率档居于优势,就是在小功率范畴亦能和常规电源相比拟。总之,随着缺点的改善或克服,人们的态度也发生了变化,纷纷转向这种新

颖电源,从而使其一跃成为当今电源的主流。据日本电子科学报道^[3],从1975年起到1980年短短的五年之间,这类新颖电源在整个电源市场上所占比例发生了非常大的变化,例如,美国1975年为8%,1980年预计可达19%;日本1975年为1%左右,1978年为10%,1980年可望达到15—20%。从近几年终端设备和测量仪器等微处理器化的趋势看,上述预计很可能还要超过。最近这种新颖电源在技术性能方面已经能和常规电源相媲美,因而它的应用已不只限于以电子计算机为代表的数字式机器,甚至连以往对尖峰噪声十分忌讳的通信、测量以及音响等系统现在也可以使用,正逐步浸入到以常规电源为主导的范畴,足见其在国际上发展之迅速、应用之普遍。

即便这类新颖电源称得上得到了蓬勃发展,甚至可以称之为电源方面的突破,但整个稳压电源小型化的进程和其它电子设备相比仍显得相当不够,所以,整个电源系统今后的发展方向仍将沿着进一步小型化、高效率和高可靠性、进一步改善技术性能和降低价格等方向前进。电源的小型化将取决于频率的提高和效率的改善,这在很大程度上将有赖于元器件的进步。

目前国外这类电源的各制造厂商已形成了各自的系列,输出电流从数十毫安到200—300安培,尤以15—100安培之间为多(随着微处理机的发展,近来小功率开关电源的产品正在日益增多);外形结构以机器组合形式为主;控制电路已逐渐过渡到单片集成电路;功能正在完善,一般都具备远距离调节输出电压、远距离或程序接通和断开电源的控制端以及并联运行等各种功能。

尤其值得指出的是这类电源的并联运行功能,它不仅可以扩大单台电源的容量、提高电源系统的供电质量、克服传统供电方式的种种弊病,而且,可以应用可靠性工程中备用可维修 $K-n(F)$ 系统的概念从而大大提高了直流稳压电源系统的可靠性,这将会改变大中型电子设备直流电源系统供电的格局,使电源变成积木式商品,因而也将影响到今后单台电源输出电流等级的选择和组成,用户将可以用不多的电流品种获得各种不同的容量等级,从而加

速了电源标准化、系列化的进程。

我国约于 1973 年开始这类新颖电源的研制。1975 年三重扩散工艺高耐压大功率硅晶体管以及大电流开关二极管的试制成功,随后,四端电解电容器的制成和磁心材料结构、性能的改善,脉宽调制变换器型稳压电源进入了实用化阶段。几年来的实践表明,采用国产元器件可以获得 5V100A 左右的单台输出功率,其平均故障间隔时间可达 15000 小时以上,经过大型电子计算机以及其它电子设备的使用,其可行性已不再有人怀疑。随着元器件的发展,电源的工作频率从 1973 年时的 3kHz 已过渡到 15kHz、20kHz 左右;电路形式在大中功率范畴以半桥式为主,近年来随着我国微处理机和电视机的发展,小功率单端变换器的发展非常迅速,在上述范畴正在逐步取代常规串联线性调整型稳压电源;在通讯系统中的试用也得到了可喜的结果。总之,应用范围正在日益扩大。1979 年开始,备用并联可维修 $K-n(F)$ 系统的研制成功并在大型电子计算机上获得了应用,(6+1) 系统可获得 5V420A 的额定输出能力并有 70 A 的贮备量¹⁾;采用电流重叠技术的单端反激变换器 8 路并联可获得 5V300A 的输出,亦在实验室试制成功,这都表明我国这类电源技术发展到了一个新阶段。我国单片集成型控制电路的发展较慢,因而,控制电路仍以分立元件电路和单元集成电路为主。近来,在这类电源中引入由电感、电容串联构成负阻补偿元件,采用自激振荡和脉冲频率调制技术,将使控制电路大为简化。

然而,总的说来,我国这类新颖电源的发展仍不够快,使用亦不够普遍,这将有待我们共同努力。

1) 详见第十章。