

# 现代高频开关电源 实用技术

刘胜利 编著 严仰光 审校



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

# 现代高频开关电源实用技术

刘胜利 编著

严仰光 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书详细介绍了采用国际最新型 MOSFET、IGBT 电子电力器件、多种新型 IC 控制系统和国产优质磁性材料设计的现代高频开关稳压电源。其工作频率达 100kHz，功率容量为 15 ~ 3000W，主变换器结构有反激式、正激式、半桥式、全桥式等，其中既有 PWM 脉宽调制的“硬开关”电源电路，又有热门的移相控制“软开关”电源电路。特别是介绍了各种 15 ~ 50W 单端反激式开关电源和 1000 ~ 3000W 软开关移相控制零电压全桥变换器稳压电源，以及高频有源功率因数校正器等设计实例。

本书通过大量精确记录的试验数据和实测波形，向读者详细介绍试制过程中遇到的许多难题、故障现象和解决思路。给出了实际测量的各类电源控制系统专用集成电路工作特性与控制曲线。讲述了实际制作各种高频开关稳压电源的主功率变压器、驱动变压器、辅助电源变压器，以及制作各种电源的输出滤波电感器、谐振电感器、升压电感器等，便于工程技术人员掌握实用的设计方法与制作技巧。

本书可供研究基础电源、开关电源、工业电源、通信电源、高频有源功率因数校正电源、UPS 不间断电源、车载或机载电源、仪器设备电源等工程技术人员参考，也可供大专院校师生参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，翻版必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代高频开关电源实用技术/刘胜利编著. —北京:电子工业出版社, 2001.9

ISBN 7-5053-6929-6

I. 现... II. 刘... III. 高频-开关电源 IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 055146 号

书 名: 现代高频开关电源实用技术

编 著 者: 刘胜利

审 校 者: 严仰光

责任编辑: 祖振升

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室监制

印 刷 者: 北京兴华印刷厂

装 订 者: 三河市双峰装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 40.25 字数: 1000 千字

版 次: 2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6929-6  
TN·1463

印 数: 6 000 册 定价: 80.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请向购买书店调换;若书店售缺,与本社发行部联系调换。电话:68279077

## 前 言

研制现代高频开关稳压电源是一项要求知识面宽、难度很大、又有危险的复杂技术。在试验板上要输入交流 220 伏电压,它经过全波整流滤波后输出 + 300 V 直流高压;若经过功率因数校正器升压储能电感,则高压达 + 400V;试验中若主功率高压开关管工作状态不正常,如驱动脉冲波形畸变,或是高频变压器磁芯饱和短路,或桥式变换器出现“共态导通”,就可能造成管壳爆炸,炸碎的管壳四处喷射,铝散热片也被熏黑。有人劝告太危险不能再搞,我回答:即使戴盔甲也要坚持干下去。

与过去 20 年我熟悉的彩色电视机、微机显示器技术相比,研制高频开关电源更为困难。因为高频开关电源特有的主功率变压器,其磁芯材料工作状态难以用电路物理方程式来描述和确定。现代高频开关稳压电源涉及的技术领域,比前者更为丰富奇特,多数是模拟电路,特别是增加了磁路变化的新知识。自研究高频开关稳压电源后,深感这项技术充满了风险与乐趣。

1999 年夏季,作为电源技术的探索者,我开始动手编写一本新书《现代高频开关电源实用技术》。这是由于八年来试制成功了多种反激式、正激式、半桥式中小功率(15W ~ 100W ~ 500W)硬开关稳压电源,和三种 1000W ~ 3000W、100kHz 软开关移相控制全桥变换器高频稳压电源样机,并实现了 600W ~ 2000W 高频有源功率因数校正器样机;在这同时我日积月累,不厌其烦地及时记录了 1800 多页第一手试验数据、测量波形、实验现象、分析计算、多次修改设计试验等,包括许多特殊情况和多次炸毁主功率开关管的原因判断,不断完善优化了稳压电源的实用参数和控制特性。

我的工作得到了国内多位杰出电源专家的亲自指导,特别是南京航空航天大学严仰光教授给了我许多的帮助;同时我反复、认真查阅了近年来美、日、德十余家公司 10 000 多页的产品资料,消化吸收其中有用的部分新器件与新电路技术;并在 Internet 网上追踪查找了国际电源新型 IC 和功率器件的情况。

现代高频开关稳压电源技术涉及的内容是极其广泛和十分复杂的。它横跨了三个学科:一是微电子精细加工的智能化专用集成电路控制芯片系统;二是正在快速更新的高性能功率半导体 MOSFET 和 IGBT 等电力电子器件;三是要合理选用、绕制各种电感器件和高频变压器所用的磁性材料,有软磁铁氧体、金属铁粉芯、非晶和微晶等几大类。

高频开关稳压电源已广泛用于基础直流电源、交流电源、各种工业电源(电焊、电解、加热、充电、超声、电机调速等)、通信电源、(舰船、飞机)逆变电源、计算机电源、UPS 不间断电源、医疗和照明电源、雷达高压电源、音响和视频电源等。它能把电网提供的强电和粗电,转换成各种电气设备和仪器所需要的高稳定度精电和细电(提供不同规格的电压和电流值),它是现代电子设备重要的“心脏供血系统”。维修人员发现,实际上电气设备的常见故障,有一半出在电源问题上。

20 世纪 90 年代以来,高频功率变换技术飞速地发展,不断涌现了新型电力电子器件、高智能化 IC 和新电路拓扑,创造出十年前意想不到的许多新型稳压电源。它们具有高性

能、高效率、高可靠性和低噪声、低污染品质,极大地节约了电能、降低了材耗与成本,缩小了体积和重量,明显减少了电磁干扰。现代电源技术正以空前的规模改造着传统的旧式电气设备,广泛进入了国民经济和人类生活的各个领域。生产电源器件的著名厂家有:UNITRODE 公司、IR国际整流器公司(International Rectifier)、Micro Linear(微线公司)、美国APT 公司、美国POWER-Integrations 公司、MOTOROLA、IXYS公司等。

发展了20多年的脉宽调制PWM高频开关稳压电源,工作频率低于20kHz,采用电压反馈或电流反馈控制。它是通过中断功率通量和调节占空比方法,改变驱动电压脉冲宽度来调整和稳定输出电压,使器件工作在“硬开关”状态,即强迫关断(电流不为零时)或强迫导通(电压不为零时),使功率管开关期间同时存在高压与大电流的交叉,因此开关损耗大,尖刺干扰强。变压器漏感与大电流变化率激起的高电压尖峰,不仅易损坏功率管,还产生明显电磁辐射,降低了可靠性和电源效率。

新出现的零电压转换ZVT(Zero Voltage Transition)和零电流转换ZCT技术,或者称软开关技术(Soft-Switching),综合了PWM开关与谐振变换技术两者的优点:既有脉冲方波高效传递功率和恒频控制便于优化参数,又有谐振技术的低损耗和零电压转换的特点。这种“零开关”技术充分利用变压器漏感与功率管输出结电容之间的谐振,产生满足零电压导通或者零电流截止的条件,使开关管导通时电压为零,截止时流经开关的电流为零。因此大大减少了功率管的开关电压、电流应力和尖刺干扰,降低了损耗,开关频率明显提高。现代高频稳压电源的软开关技术和有源功率因数校正技术正快速发展。

电力电子技术本质上是一门实验科学。本书是我多年消化吸收、综合运用世界一流IC和新功率器件作详细试验、认真记录的成果,也是合理选用各种国产优质廉价磁性材料、实际制作了多种电感线圈和变压器的总结:主功率变压器、驱动变压器、辅助电源变压器、输出滤波电感、附加谐振电感、辅助谐振电感、PFC-Boost储能升压电感等。

需要特别说明,作者在研制新型电源和编著本书时,参考了严仰光、阮新波、徐德鸿、齐长远、李龙文等专家、教授发表的文章和著作,以及一些生产厂家提供的产品手册,在此致以感谢。电子工业出版社祖振升编辑从内容、版式到图表加工,做了大量工作,付出了艰辛的劳动,在此一并致谢。

由于经验不足,精力有限,难免有不妥之处,欢迎各位同志指教。

刘胜利

2001.4

# 目 录

<b>第一章 现代电源领域的新进展</b> .....	( 1 )
第一节 新型 MOS 器件加速了电力电子学的发展 .....	( 1 )
第二节 现代高频开关稳压电源功率变换用电力电子器件 .....	( 2 )
第三节 低电荷的功率 MOSFET 系列器件 .....	( 4 )
第四节 高速 IGBT 功率管 WARP-Speed 系列 .....	( 6 )
第五节 脉宽调制与功率开关 PWM/MOSFET 复合 IC .....	( 7 )
第六节 功率因数校正与脉宽调制 PFC/PWM 复合 IC .....	( 9 )
第七节 最新超低导通电阻、低损耗 MOSFET:IRFPS37N50A .....	(13)
<b>第二章 三脚 PWM/MOSFET 复合单片 TOPSwitch-II</b> .....	(17)
第一节 TOPSwitch-II 的 IC 内部功能与设计特点 .....	(17)
第二节 用 TOPSwitch-II 组成的 20W 和 150W 稳压电源 .....	(22)
第三节 TOPSwitch-II 的使用要点、参数与特性曲线 .....	(25)
第四节 TOPSwitch 组成单端反激式开关电源三种工作状态分析 .....	(33)
第五节 由 TOPSwitch-II 功耗曲线快速选择器件 .....	(39)
第六节 TOPSwitch 作功率因数校正器的应用电路 .....	(46)
<b>第三章 用 EI-28、PQ26/25 和 TOPSwitch 制作单端反激式稳压电源</b> .....	(47)
第一节 单端反激式开关稳压电源的基本工作原理 .....	(47)
第二节 TOPSwitch 组成单端反激式开关电源的设计流程图 .....	(54)
第三节 单端反激式开关电源的参数分析与计算公式 .....	(65)
第四节 单端反激式开关电源变压器的参数设计、磁芯选择、绕制方法与绝缘措施 .....	(76)
第五节 用 EI-28、TOP202 制作 20W 开关电源变压器的绕制工艺、漆包线选用与电网变化试验 .....	(87)
第六节 用 PQ26/25、TOP204 制作 40W 开关稳压电源和气隙调节试验 .....	(97)
<b>第四章 用 TL494、IRFP450、EE42、EE55 等制作 200W、300W 单端正激双管式开关稳压电源</b> .....	(106)
第一节 单端正激变换器的工作原理及实用电路 .....	(106)
第二节 200W 正激变换器主功率变压器的设计与绕制工艺 .....	(113)
第三节 TL494 的设计特点、脉宽调制特性试验曲线与死区时间控制 .....	(116)
第四节 光耦控制电路 4N35/TL431 的计算方法 .....	(126)
第五节 驱动电路设计、实测波形与变压器的绕制 .....	(131)
第六节 辅助电源和过流保护、软启动电路的实用设计 .....	(135)
第七节 TL494 的电气参数 .....	(139)
<b>第五章 用 SG3525、EE55 等制作 500W 半桥变换器</b>	

<b>高频开关稳压电源</b> .....	(143)
第一节 半桥变换器工作原理及实用电路.....	(143)
第二节 500W 半桥式主功率变压器 EE55 的参数设计与绕制工艺 .....	(146)
第三节 脉宽调制控制器 SG3525 功能与电气参数 .....	(151)
第四节 500W 开关电源驱动电路的设计与变压器绕制 .....	(155)
第五节 IC 辅助电源电路、过流保护与输出整流器电路的设计 .....	(157)
第六节 功率 MOSFET 开关管 IRFP450LC 电气参数 .....	(162)
<b>第六章 软开关移相控制全桥变换器一个完整周期十二个工作过程的详细分析</b> .....	(165)
第一节 软开关移相控制全桥变换器主电路原理图.....	(165)
第二节 软开关移相控制全桥变换器工作原理与展宽的电压、电流波形相位关系 .....	(166)
第三节 一个完整开关周期中正半周的六个工作过程详细分析.....	(169)
第四节 一个完整开关周期中负半周的六个工作过程详细分析.....	(173)
第五节 试制软开关移相控制全桥变换器稳压电源的体会.....	(176)
第六节 全桥软开关电源移相谐振控制器 UC3875 的电气参数.....	(179)
第七节 高速 IGBT 功率管 IRG4PC50W 的电气参数与特性 .....	(185)
<b>第七章 用 UC3875、IRFP460、PQ50/50 等制作两种 100kHz、1000W(±15V、30A; 48V、20A)全桥软开关电源</b> .....	(188)
第一节 1000W(±15V、30A;48V、20A)全桥软开关电源的实用电路和印制板布局.....	(188)
第二节 全桥变换器工作原理与 1000W 全桥软开关稳压电源的实测波形 .....	(193)
第三节 1000W 全桥主功率变压器 PQ50/50 参数设计与绕制工艺 .....	(197)
第四节 全桥变换器驱动电路的设计特点与驱动变压器的绕制技术.....	(202)
第五节 1000W 全桥软开关电源附加谐振电感 $L_r$ 的设计与制作 .....	(209)
第六节 全桥软开关电源的辅助谐振网络工作原理与电感器制作.....	(215)
第七节 低栅荷功率 MOSFET 开关管 IRFP460LC 的电气参数与特性 .....	(221)
<b>第八章 制作 100kHz、2000W 移相控制全桥软开关电源</b> .....	(225)
第一节 2000W 移相控制全桥软开关电源电路和总体布局 .....	(225)
第二节 2000W 全桥变换器主功率变压器的参数设计与绕制工艺 .....	(228)
第三节 大功率高频开关电源输出滤波电感器的设计与制作.....	(234)
第四节 核算辅助谐振网络的各项参数.....	(241)
第五节 大功率稳压电源的散热与整机效率.....	(247)
第六节 改进型 UC3879 的工作原理.....	(249)
<b>第九章 制作 100kHz、3000W 全桥软开关稳压电源</b> .....	(257)
第一节 试制 3000W 全桥软开关电源的情况 .....	(257)
第二节 3000W 全桥软开关电源的主功率变压器参数设计 .....	(260)
第三节 原边电流互感器与单向的副边电流互感器的制作.....	(264)
第四节 大功率电源主开关管(MOSFET、IGBT)的并联使用技术.....	(268)

第五节	超低导通电阻、低损耗功率 MOSFET-IRFPS37N50A 电气参数与特性	····· (275)
第六节	UC3879 的电气特性、参数和应用电路	····· (281)
第七节	开关电源副边整流二极管的脉冲尖峰干扰与抑制方法	····· (288)
<b>第十章</b>	<b>制作 500 ~ 2000W 高频有源功率因数校正器</b>	····· (293)
第一节	有源功率因数校正 PFC 的基本工作原理	····· (293)
第二节	UC3854 功能介绍	····· (304)
第三节	UC3854 功率因数校正器的性能优化	····· (313)
第四节	UC3854A/B 功能介绍	····· (317)
第五节	对 PFC 前端输入正弦电流的功率限制	····· (324)
第六节	已试制的 500 ~ 2000W 高频有源功率因数校正器(PFC)实用电路 与实测数据	····· (330)
第七节	BOOST-PFC 升压储能电感器的设计方法与磁芯选择	····· (336)
第八节	主功率开关管 APT5020BVR、快恢复二极管 APT60D60B 电气参数与特性	····· (344)
<b>第十一章</b>	<b>软开关 PFC 控制器 UC3855A/B 功能原理与应用</b>	····· (348)
第一节	软开关 PFC 控制器 UC3855A/B 电气参数	····· (348)
第二节	高性能功率因数预调节控制器 UC3855A/B 工作原理	····· (356)
第三节	UC3855A/B 设计应用	····· (366)
第四节	一种用于 APFC 的改进型 ZVT-BOOST 电路	····· (378)
<b>第十二章</b>	<b>有源功率因数校正技术在彩电、微机、显示器和照明电源中的作用</b>	····· (384)
第一节	彩色电视机开关电源的有源功率因数校正方法	····· (384)
第二节	微机、显示器开关电源增加 UC3842 等 可具备 PWM / PFC 两种功能	····· (390)
第三节	UC3842 的电气参数与功能特性	····· (396)
第四节	电子镇流器系统专用 IC 控制器 ML4831 ~ ML4833 功能特性	····· (403)
<b>第十三章</b>	<b>功率因数校正器 UCC3857、UCC3858、UC3854</b>	····· (412)
第一节	隔离式输出可调节有源功率因数校正器 UCC3857 电气参数	····· (412)
第二节	功率因数校正器 UCC3857 电路分析	····· (417)
第三节	“能量之星”UCC3858 电气参数	····· (424)
第四节	UCC3858 电路设计分析	····· (429)
第五节	功率因数校正器专用集成电路 UC3854 原理	····· (437)
第六节	UC3854 实际电路设计步骤与计算	····· (444)
<b>第十四章</b>	<b>功率铁氧体磁性材料</b>	····· (460)
第一节	铁氧体磁性材料概述	····· (460)
第二节	铁氧体磁性材料的各项物理特性定义与计算公式	····· (461)
第三节	低损耗的 LP 与高磁导率的 HP 磁性材料系列特性参数	····· (464)
第四节	EE、PM、PQ、RM、EP 型磁芯规格、尺寸、参数	····· (469)
<b>第十五章</b>	<b>金属磁粉芯磁性材料</b>	····· (480)
第一节	金属磁粉芯磁性材料的应用与分类	····· (480)



第二节	铁粉芯、铁硅铝、坡莫合金的特性曲线·····	(482)
第三节	金属磁粉芯磁性材料特性、分类与应用·····	(484)
第四节	铁粉芯的特性参数与计算公式·····	(487)
第五节	钼坡莫合金粉芯的特性参数·····	(488)
第六节	高磁通粉芯的特性参数·····	(488)
第七节	金属磁粉芯磁性材料的尺寸规格·····	(489)
<b>第十六章</b>	<b>ZVS-ZCS 零电压零电流软开关电源全桥变换器工作原理</b> ·····	<b>(491)</b>
第一节	ZVS-ZCS 零电压零电流开关 PWM DC/DC 全桥变换器工作原理·····	(491)
第二节	滞后桥臂 ZCS 的参数设计、仿真与实验结果·····	(495)
第三节	ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器电路控制方式·····	(499)
第四节	IXYS-MOSFET 功率开关管 IXFH30N50 与 单管 IGBT CT60AM-20 电气参数·····	(501)
<b>第十七章</b>	<b>多台电源模块迭加输出 30000W 电力柜的负载均流技术</b> ·····	<b>(505)</b>
第一节	负载均流技术概况·····	(505)
第二节	UC3907 均流控制 IC 的工作原理·····	(508)
第三节	负载均分控制器 UC3907 各引脚功能与电气参数·····	(517)
<b>第十八章</b>	<b>IGBT 厚膜驱动器 HL402B/403B、PWM 全桥软开关控制器 XH3942</b> ·····	<b>(523)</b>
<b>第十九章</b>	<b>非晶、微晶合金磁性材料性能与应用简介</b> ·····	<b>(531)</b>
<b>第二十章</b>	<b>高频有源功率因数校正器基本单元电路分析与计算</b> ·····	<b>(536)</b>
第一节	PFC 的两种控制方法·····	(536)
第二节	UC3854 控制 PFC 电路的设计原理·····	(540)
第三节	800W 有源功率因数校正器实用电路与计算方法·····	(551)
第四节	UC3854 的最小输出脉宽问题·····	(556)
<b>第二十一章</b>	<b>PFC 电子镇流控制器 ML4835 和复合 PFC/PWM 控制器 ML4803</b> ·····	<b>(560)</b>
第一节	复合 PFC 电子镇流控制器 ML4835·····	(560)
第二节	用 ML4835-EVAL 电路板制作可调光荧光灯电子镇流器·····	(572)
第三节	复合 PFC/PWM 新品 ML4803·····	(586)
第四节	ML4803 组成具有 PFC 功能的 240W 开关稳压电源·····	(592)
<b>第二十二章</b>	<b>开关电源控制器 TDA16846 系列、移相控制器 UCC3895、 单片 TOPSwitch-GX 系列</b> ·····	<b>(605)</b>
第一节	TDA16846/TDA16847(复合 PWM/PFC 充电泵)·····	(605)
第二节	TDA16846/TDA16847 主要电路性能·····	(609)
第三节	先进的 BCDMOS 全桥软开关电源移相 PWM 控制器 UCC3895·····	(618)
第四节	单片 TOPSwitch-GX 系列(250W)设计特点和实用电路·····	(627)
<b>主要参考文献</b> ·····		<b>(633)</b>

# 第一章 现代电源领域的新进展

本章内容包括如下七节：

- 新型 MOS 器件加速了电力电子学的发展
- 现代高频开关稳压电源功率变换用电力电子器件
- 低电荷的功率 MOSFET 系列器件
- 高速 IGBT 功率管 WARP-Speed 系列
- 脉宽调制与功率开关 PWM/MOSFET 复合 IC
- 功率因数校正与脉宽调制 PFC/PWM 复合 IC
- 最新超低导通电阻、低损耗 MOSFET: IRFPS37N50A

## 第一节 新型 MOS 器件加速了电力电子学的发展

一切电子设备都离不开电源提供能量,稳压电源电路大量采用了电力电子技术和功率半导体器件。现代高频开关稳压电源是一门涉及众多学科的复杂技术,它们已广泛用于工业、交通、电力、通信、家用电器等领域,成为十分活跃的热门技术。

50年前(1947年)发明的晶体管,是半导体技术的起点。最早的半导体功率器件,起始于1958年的晶闸管,又称SCR可控硅整流器,它是传统电力电子技术的第一个阶段。过去常把电力电子学与功率电子学划等号,是受传统晶闸管整流器用于大功率系统的长期影响,以为电力电子学仅限于处理大功率范围。创办了50年的美国IR(International Rectifier)公司,其名称仍然保持了国际“整流器”专业特色,因为当时的大功率电力整流器产品,就是半导体功率器件的主体。

60年代出现了快速晶闸管,到70年代又研制成功了高压大电流的门极可关断晶闸管GTO、电力巨型晶体管GTR,它们都是双极型电力半导体器件,逐渐取代了传统的SCR,广泛用于直流电机调速、感应加热、静止励磁、电化学电源、电焊机、高压直流输电等。这些大功率器件与微处理机相结合,不断完善自动控制技术,使电力电子技术迅速进入了“自关断器件”的第二个阶段。

70年代中后期又出现了MOS场效应晶体管,特别是80年代问世的功率场效应管VDMOS(又称“功率MOSFET”),以及派生的MOS型绝缘栅双极晶体管IGBT,其特性和功能更新发展,它们联通了微电子学与电力技术两大学科,使功率变换和稳压电源技术发生了新的飞跃,使电力电子技术发展到高频化、智能化的第三个阶段。

由于MOS场效应管是多子型器件,具有优良的高频特性,能大大提高稳压电源的开关频率,明显减少早期电源变压器材料的重量和体积,使其性能与效率大为提高。因MOSFET又是一种电压控制器件,其栅极驱动功率显著低于少子型的双极管,故可用一些专用高压集成电路直接控制,甚至可把主功率器件与自动控制芯片和保护电路做在单片IC中,

大大简化了电源整机电路的元器件数目,变革了控制观念。

90年代以来,人们发现不论是看电视、听音响、用计算机,还是开汽车、乘电梯、开空调,或者是用大哥大、电冰箱、微波炉等等,几乎在家用电器、工业控制、通信、交通等国民经济的所有领域,都有由各种先进的电力电子新器件组成的现代电源,它们全面渗透在电能节约、功率变换和自动化控制的每一个应用领域。表 1-1 给出 50 年来电力电子开关器件的几个发展阶段。

表 1-1 电力电子开关器件的发展阶段

50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代
可控硅 SCR (晶闸管)	快速晶闸管	可关断晶闸管 GTO	①高压 GTO ②IGCT ③MCT(MOS 晶闸管)	大容量、大功率、高性能、 省吸收与 IGBT 结合,优 势互补
		电力晶体管 GTR	①IGBT 绝缘栅晶体管 ②功率 MOSFET	①高速 IGBT; WARP - Speed ②低电荷功率 MOSFET

## 第二节 现代高频开关稳压电源功率变换用 电力电子器件

电力电子器件广泛用于开关稳压电源的每个环节,利用各种晶体管来变换频率、变换功率、自动控制、节约电能等。电力电子技术实质上是一门应用半导体器件进行功率变换的学科,它能把电网的“粗电”变换成各种电子设备所需要的“精电”。通常把现代高频开关稳压电源的功率变换过程分解为四个环节:输入整流、控制系统、开关变换、输出整流,见示意图 1-1。

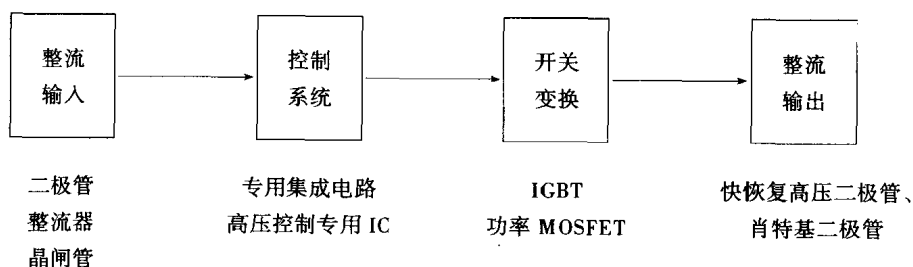


图 1-1 四个环节用电力电子器件

### 一、现代高频开关稳压电源变换过程

(1)输入整流 先用二极管桥式整流器电路把交流电整流为直流电。从大的角度看,输入整流环节的元器件类型几十年来变化不大。仅中小功率器件的塑封外形变化较多:常规的 TO-220、TO-247 等和新发展的表面贴装 SMD-10 等。输入级除了具备整流功能外,还有限流和功率因数调整功能。

(2)控制系统 指多种专用控制集成电路,如各类 PWM 脉宽调制或者移相控制 IC 等,

用于触发在逆变工作状态下的功率 MOSFET 或 IGBT 等。新的功率集成电路(Power-IC)包括了带智能保护的 Smart-FET 器件,它与普通的 CIC 不同,它不是一种触发器件,而是具有保护功能的功率 MOSFET。还有微电子固态继电器 MER,包含光电耦合、控制 IC 等。

(3) **开关器件** 是电力电子技术发生重大变化的领域,也是开关稳压电源实现高频化、高效率、高可靠性的关键环节。50 年代出现可控硅 SCR,60 年代快速晶闸管进入逆变领域;70 年代研制了性能优良的自关断器件 GTR 和 GTO。80 年代涌现出各种高频化全控型功率半导体开关器件:功率 MOSFET、绝缘栅晶体管 IGBT、混合型 MOS 晶闸管(MCT)和 IGCT 等。并涌现出 1000V 高压 MOSFET、和 150kHz 高速 IGBT 等。

(4) **整流输出** 低压输出,要求速度快、通态电阻小。肖特基二极管是常用的一种。

## 二、现代高频开关电源所用新型电力电子器件的发展趋势

(1) **集成化、高密度化** 它包括了两层涵义,一是构成 MOSFET 大功率器件的元素微观化、更加密集;二是指小功率的 MOSFET 也集成在单片 IC 中,包括系统控制、驱动、保护、检测、末级功率开关等。

为了提高功率开关器件的性能,几乎所有的全控型器件都由许多单元胞管子并联组成,也就是一个功率器件由众多子器件集成:如一只 50A 的大功率管 MOSFET 含有上万个单元胞管,一只 300 A 的静电感应晶闸管 SITH 含有 5 万个子器件,一只 1000A 的 GTO 则由近千单元 GTO 并联而成。

(2) **高频化** 提高主功率变换器件的开关速度,可明显减小磁性变压器材料和大容量电解电容器的体积、重量等。

开关器件成了功率半导体器件的主角,研制工作从改进电压、电流的两维体系,发展到再提高频率的三维体系,新技术应用于各种电源产品,改善了动态参数和开关损耗。

MOSFET 和 IGBT 都增加芯片元胞的密度,可增大所有元胞总周界的长度,使其通态电阻减小,缩短单元胞对角线,使每个单元胞中电流流经线最短,即以更细的线条来换取器件的快速性。新一代 MOSFET 制造工艺精密度增加,与超大规模 IC 的工艺已很接近。IR 公司的高速 IGBT-WARP Speed 系列实用频率达到 100kHz,开关损耗明显下降。另外,出现了几千赫的低频高压大电流 GTO、GTR,以及数百千赫的 MOSFET、数兆赫的 SIT(静电感应晶体管)等。

(3) **大容量化、模块化** 功率 MOSFET 已有 200A/60V 和 50A/500V;90 年代中期出现了 600A/1800V 和 1000A/3000V、50kHz 的 IGBT;目前已研制出高压 5000V、100A 的 IGBT。

(4) **模块扩容** 例如晶闸管 1000A/12000V、6000A/8000V 已问世;快速晶闸管(关断时间达 8 ~ 50 $\mu$ s)为 1600A/2500V,光控晶闸管有 6000A/6000V;可关断晶闸管 GTO 达 2500A/9000V、6000A/6000V、1kHz;达林顿电力晶体管 GTR 则出现了 1000A/1800V、频率 2kHz,但它们将逐渐被 IGBT 所取代。

(5) **采用最新的半导体材料** 碳化硅、砷化镓、金钢石片等,使电力电子器件的性能更加优越,可靠性更高。碳化硅与合成金刚石都有特宽的频带、高导电率和导热率。合成金刚石的电力 MOSFET 工作频率比硅器件高 50 倍,功率容量大几百倍以上,导通压降低一个数量级,工作结温可达 600 $^{\circ}$ C。

### 第三节 低电荷的功率 MOSFET 系列器件

1997 年美国 IR (国际整流器) 公司推出了最新的低电荷 HEXFET, 即新型 MOSFET 功率管 IRFP450LC、IRFP460LC、IRF740LC、IRFBC40LC 等。由于采用了新工艺 (用较窄的多晶硅线、较厚的栅极氧化层、较低的沟道注入), 使功率 MOSFET 工作效率明显提高。

- 使 MOSFET 栅极电荷  $Q_g$  与输入电容  $C_{iss}$  减少了 40%, 可显著降低栅极驱动功率, 减少了开关电源、照明镇流器、DC/DC 变流器的驱动成本。
- 使栅-漏 Miller 反馈电容量  $C_{rss}$  减少了 85%, 故 MOSFET 管的总开关损耗减少了一半, 明显提高了开关效率。
- 使栅极额定电压增大一倍, 达到  $\pm 30V$ 。可去掉栅-源并联的齐纳管, 大大提高了功率管的  $dv/dt$  抗扰度, 从而减轻或取消吸收电路。
- 使开关频率可提高到 500kHz ~ 1MHz 以上。
- 新推出的低电荷 HEXFET 功率开关管, 输出电容  $C_{oss}$  明显小于第三代产品, 见表 1-2。

表 1-2 低电荷 MOSFET 与原第三代产品输出电容值的比较

芯片尺寸	输出电容值 $C_{oss}$ (第三代)(pF)	低电荷输出电容 $C_{oss}$ (pF)	输出电容的减小量(%)
6	1100	540	51
6	870	440	49
6	440	400	9
5	660	390	41
5	820	320	56
5	300	270	10
4	330	190	42
4	310	170	45
4	160	140	13

美国 APT 公司 (Advanced Power Technology Cop) 在 1996 年也实现了第五代功率 MOSFET 的突破性发展。由于采用三维设计完成了特殊的控槽工艺, 实现了叉指式开胞沟槽设计。它扩大了芯片的有源面积, 更好地抑制了寄生双极管的导通现象 (这是烧毁 MOSFET 的主要原因), 提高了雪崩能量的额定数值  $E_{AS}$ , 并有效地减少了通态电阻值  $R_{DS(ON)}$ , 降低了双极管激活效应。表 1-3 比较了三代有相同静态参数的功率 MOSFET 动态特性。

表 1-3 MOSFET 器件性能的提高

参 数	名 称	IR 第三代 IRFP460	IR 新一代 IRFP460LC	APT 第四代 APT5027-BNR	APT 第五代 APT5027-BVR
$BV_{DSS}(V)$	漏-源击穿电压	500	500	500	500
$I_{D(ON)}(A)$	通态漏极电流	20	20	20	20
$R_{DS(ON)}(\Omega)$	通态电阻	0.27	0.27	0.27	0.27
$E_{AS}(mJ)$	重复雪崩能量	28	28	30	30
$C_{iss}(pF)$	输入电容	4200	3600	3400	2600
$C_{oss}(pF)$	输出电容	870	440	480	362
$C_{rss}(pF)$	反向传输电容	350	39	200	145
$Q_g(nC)$	总栅电荷	210	120	145	120
$Q_{gs}(nC)$	栅-源电荷	29	32	12	13
$Q_{gd}(nC)$	栅-漏 Miller 电荷	110	49	63	48
$t_{d(on)}(ns)$	导通延迟时间	18	18	12	14
$t_r(ns)$	上升时间	59	77	19	15
$t_{d(off)}(ns)$	关断延迟时间	110	40	74	40
$t_f(ns)$	下降时间	58	43	26	26
$V_{SD}(V)$	体二极管正向压降	1.8	1.8	1.3	1.3
$t_{rr}(ns)$	体二极管反向恢复时间	570	570	470	410

表 1-4 给出 APT 公司第五代功率 MOSFET 新产品电气性能。

表 1-4 APT 公司第五代功率 MOSFET 模块部分产品性能

型 号	$BV_{DSS}(V)$	$R_{DS(ON)}(\Omega)$	$I_{D(ON)}(A)$	$C_{iss}(pF)$	$E_{AS}(mJ)$	$P_D(W)$
APT12040JVR	1200	0.40	26	12400	3600	700
APT10025JVR	1000	0.25	34	12400	3600	700
APT60M75JVR	600	0.075	62	15500	3600	700
APT50M50JVR	500	0.050	77	15500	3600	700
APT20M11JVR	200	0.011	175	17400	3600	700
APT10M07JVR	100	0.007	225	17400	3600	700

APT 公司第五代 MOSFET 功率器件的雪崩能量额定值  $E_{AS}$ ，在出厂前做 100% 的测试，使其有更高的可靠性。因为 MOSFET 烧毁的主要原因是寄生双极管导通，有两种可能：一是 MOSFET 体内二极管的反向恢复电流，它流经双极管基区使 EB 结正偏达 0.7V 而导通；二是出现雪崩击穿时 MOSFET 耗尽层内的电子空穴流向源极也使双极管激活导通。APT 公司的全面测量  $E_{AS}$  大大提高了新产品的可靠性。

## 第四节 高速 IGBT 功率管 WARP-Speed 系列

自发明 IGBT 至今已有 16 年,它一直在中等电压范围(400V ~ 600V)的应用中与 MOSFET 功率管竞争市场。但由于其开关速度还不够快,价格下降也不如 MOSFET,因而不足以适用于许多场合。

1997 年国际整流器(IR)公司推出了目前开关速度最快的 IGBT,即 WARP-Speed 系列产品,其开关频率达到 100kHz,同时保持了 IGBT 具有较高电流密度的特点,大大扩展了 IGBT 在高频开关电源领域的用场。由于芯片面积相同的 IGBT 可利用电流密度比 MOSFET 大 2.5 倍,因此较多用于各种功率转换开关和功率因数校正电路中。新产品系列规格见表 1-5。

表 1-5 新型高速 IGBT 的静态电气性能表

型 号	集电极-发射极击穿电压(V)	通态集电极电流(A)	封 装
IRG4BC20W	600	6 ~ 10	TO-220
IRG4BC30W	600	12 ~ 18	TO-220
IRG4PC30W	600	12 ~ 18	TO-247
IRG4BC40W	600	18 ~ 26	TO-220
IRG4PC40W	600	18 ~ 26	TO-247
IRG4PC50W	600	26 ~ 36	TO-247

图 1-2 给出了 IR 公司 WARP 快速 IGBT 的关断特性测量波形与竞争的 G12N60C3D 的实测波形比较图,它们是在两个 50A、600V 的 IGBT 关断期间电压和电流的变化过程实际值。从图中看出,在 WARP 器件的电流已降到 2.5A 之后的 150ns 时间内,G12N60C3D 仍然保持最大值 12A,其所加电压仍达到 250V,故其功耗很大。该管的电流大约要经过 500ns 之后才降到 1A 以下,而 WARP 系列的 IGBT 电流只需 300ns 就能降到同样值。

研究 WARP 系列 IGBT 的技术指标相对变化时,可比较它与 IR 公司前期的 U 系列产品(Ultra-Fast)IGBT,它们的击穿电压都在 400 ~ 600V。较早的快速 IGBT 如 IRG4PC30U 开关频率低于 50kHz,可取代额定电流高于 11A 的功率管 IRFP450,而新的 WARP-IGBT IRG4PC50W 则可在 100kHz 开关频率取代常用的 MOSFET 管 IRFP460 等。

在功率转换应用中,MOSFET 的导通损耗与开关损耗之比约为 3:1,相比之下 IGBT 的导通损耗与开关损耗之比约为 1:4。MOSFET 较高的导通损耗是由较高的  $R_{DS(ON)}$  引起的,而 IGBT 较高的开关损耗是由关断时的电流拖尾产生的。有趣的是 IGBT 的总损耗,接近或者小于它要取代的功率 MOSFET 的总损耗。例如在典型功率因数校正电路中,用新的快速型 IGBT-IRG4BC30W 替代功率 MOSFET 管 MTW14N50E,在 100kHz 开关频率时,IGBT 的开关损耗为 11.2W,导通损耗为 4.7W,总值为 15.9W;而 MOSFET 的开关损耗为 4.5W,导通损耗则高出约三倍,总功耗约为 15.5W。

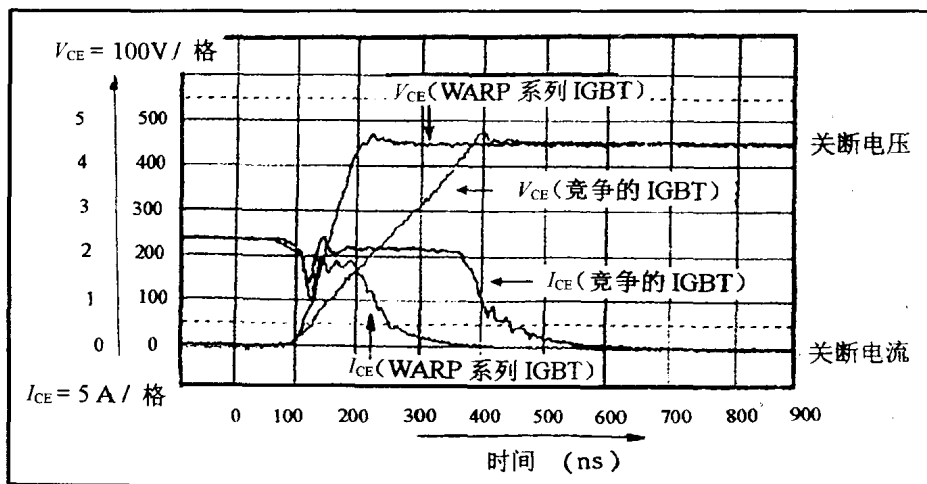


图 1-2 IR 公司 WARP-IGBT 与竞争的 IGBT-G12N60C3D 关断特性实测波形比较图

MOSFET 与 IGBT 的功耗示意图如图 1-3 所示,图中给出了在 80kHz 时的 IGBT 与 MOSFET 开关损耗和导通损耗曲线值。从本质上看,IGBT 的工作电流密度高于 MOSFET 功率管,即在每平方毫米的硅片上 IGBT 可流过更多的电流。例如,芯片面积比 MOSFET 小一倍的 IGBT,其工作电流可达到前者的二倍至三倍,见图 1-3。

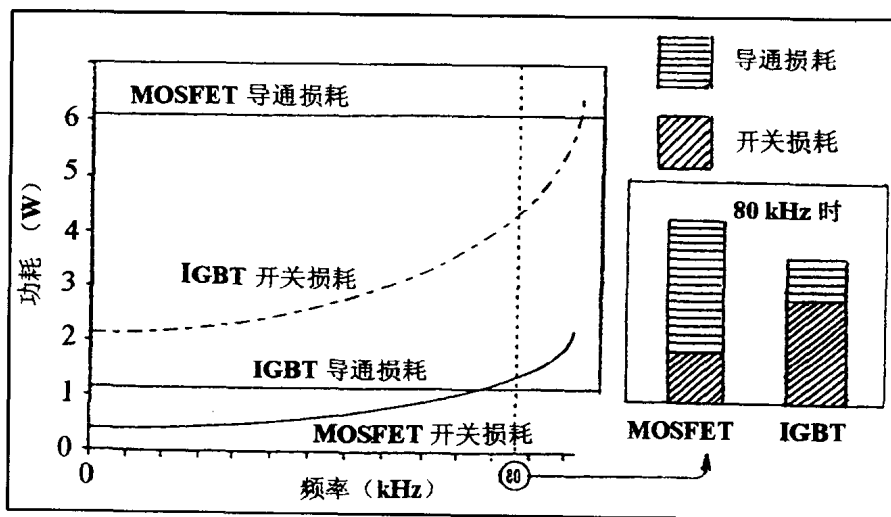


图 1-3 IGBT 与 MOSFET 导通损耗和开关损耗的频率特性关系曲线

## 第五节 脉宽调制与功率开关 PWM/MOSFET 复合 IC

早在 1992 年,美国 POWER integration 公司率先研制成号称“第三代电力电子器件”的 PWM / MOSFET 二合一单片 IC 产品 PWR-SMP210-260 系列等。它们集功率开关、控制



电路与保护电路于一体,用少量外围元器件,就能构成性能优、成本低的小功率电源,大大简化了安装调试工艺。但是与 1995 年推出的最少引脚全自动保护 PWR- TOPSwitch 系列(第四代)二合一单片 IC 相比,SMP 还存在一些缺陷:IC 引出脚较多,达 16、20、23 个引出脚;IC 内部的自动过压、过流、过热保护功能不够齐全,IC 外围电路结构不够简化等。例如:

PWR-SMP210 / 211: 有 16 个脚,  $P_D = 10 \text{ W}$ , 用 4 只脚作散热;

PWR-SMP212 / 220: 有 20 个脚,  $P_D = 15 \sim 20 \text{ W}$ , 用 6 个脚作散热;

PWM-SMP240 / 260: 有 23 个脚,  $P_D = 40 \sim 60 \text{ W}$ , 改用表面安装式封装。

只有三个引出脚的 TOPSwitch 系列二合一功率开关 IC,现已广泛用于各种小功率电器中,例如 VCD、VCR 电源,DVD、DVB 电源,手提电话充电器,电动工具充电器,多类电源模块,音响电源,通信设备电源,各种 Adaptor 电源,微型开关电源等。TOPSwitch 的突出优点是它具备如下功能:

- 二合一 IC 引脚最少:又称为三端式 PWM 高压开关电源,能完成电源全部功能;
- IC 所需外部元器件数目最少:更简化了电路结构,降低了成本,减少了电磁干扰;
- IC 具备全自动保护功能:有前沿消隐的逐个时钟周期式电流限制,有过压切断、过热关闭锁定,输入欠压锁定功能,以及关闭后再自动启动循环等功能。

TOPSwitch 的引脚安排与简化电路见图 1-4。

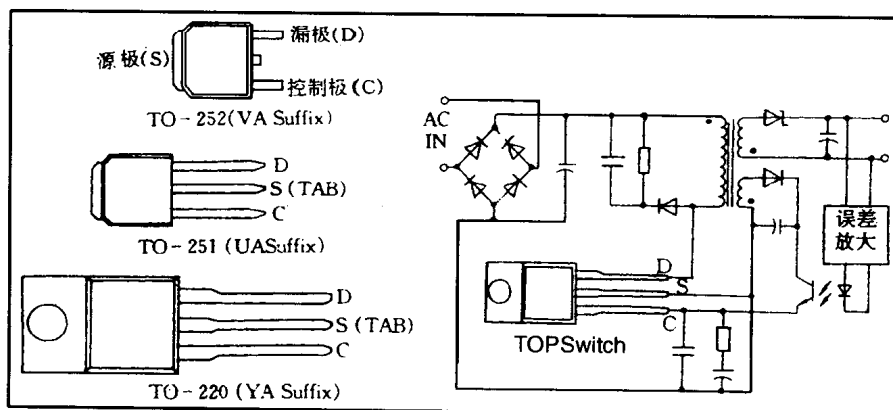


图 1-4 TOPSwitch 的引脚安排与简化电路图

TOPSwitch 常用型号和输出功率范围见表 1-6。

表 1-6 TOPSwitch 系列常用型号和输出功率范围

电网交流输入电压为 85 ~ 265V 时(W)	单值输入电压 100/115/230V 时(W)
<b>TOPSwitch-I 系列</b>	
PWR-TOP200YAI: $P_O = 0 \sim 12$	$P_O = 0 \sim 12$
PWR-TOP201YAI: $P_O = 10 \sim 22$	$P_O = 20 \sim 45$
PWR-TOP202YAI: $P_O = 15 \sim 30$	$P_O = 30 \sim 60$
PWR-TOP203YAI: $P_O = 20 \sim 35$	$P_O = 40 \sim 70$