

# 功率转换技术的现状及发展趋势

张占松 张思全 杨均 广东工业大学自动化学院 (广州 510090)

**摘要:**本文从元器件、电路和系统等几个方面,对当今国内外电力电子领域功率变换技术的发展现状及趋势进行了叙述和展望。并且结合国内外的技术和生产实际进行了论述,探讨了技术与生产相互促进,共同发展的思路。

**关键词:**功率转换 现状 新技术 趋势

时间进入 21 世纪,如何解决能源、资源和环境问题,成为困扰我们人类生存的重大问题,以功率变换为目的,以实现高效获得高品质电能为根本任务的电力电子技术,同微电子、计算机技术相结合将成功地解决这些危机。功率变换技术的发展趋势可概括为:高频化、高效率、无污染、模块化。但是随着应用面的拓展,要求的提高,还面临许多新的课题,本文就现状及发展提出看法。

## 1 半导体器件的新概念和新工艺

半个世纪以来,从氧化物、硒到晶体 P-N 结,从一个结两端、两个结三端、三个结三端、四端;从二极管、三极管到晶闸管、MOS 管等等,管子品种越来越多,都是从如何提高电压、电流、快速性和降低导通电阻等方面来着眼的。近年来,在开关管主管旁边再加上控制和保护环节,就出现了所谓的智能化、可遥控、可网络化元件。

GTO 在高电压、大电流的应用中广泛使用。最新的 GTO 设备的容量已经达到 6000V、6000A。然而 GTO 存储时间长,开关频率低,此外它需要 1/3 或 1/5 的阳极电流才能关断。这些都限制了它的广泛应用。相对来说,IGBT 就较受欢迎。IGBT 是一个电压控制设备,它只需要较少的门极驱动能量,因此简化了门极驱动设计,它有较短的存储时间,开关频率较高,然而,很大的导通压降限制 IGBT 在高电压领域的广泛应用。如今,1200V、1700V、2500V 和 3300V 的器件已投入使用,只有 600A 的器件可达到 6.5KV(图 1)。

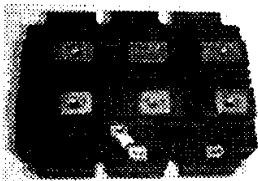


图 1 6.5KV IGBT 模块

6.5KV IGBT 设计用来可靠地工作在中级电压应用中,要求总线电压为 3KV,使用三级 NPC 结构,可以直接用于 4.16KV 的工业应用中。

另一方面,改进的 GTO 出现了。硬驱动和 MOS 辅助技术应

用在 IGCT 和 ETO,这两种器件使用统一的增益关断技术极大地削减 GTO 存储时间,使其开关表现接近 IGBT,同时具有较低的导通损失。使得 IGCT 和 ETO 比 IGBT 更流行,IGCT 和 ETO 已经达到同 GTO 一样的功率水平(6000V,6000A)。如图 2,是 ABB 的 4000A、4500V IGCT 器件。

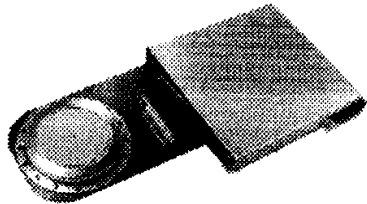


图 2 4.5KV IGCT 的物理外形

ETO 是 GTO-MOSFET 的混合产物。如图 3,其工作原理可以用开通和关断过程来说明。在 ETO 的开通过程中,开关  $Q_1$  开通, $Q_2$  关断,同时,有一个很高的电流脉冲注入 GTO 的门极。在 ETO 的关断过程中,开关  $Q_1$  关断, $Q_2$  开通,GTO 的阴极电流将立即转移到它的门极,实现关断。

在未来一段时间内,SCR 及其派生器件 IGCT(集成门极换向晶体管)仍将应用在大功率领域,IGCT 具有有效硅面积小、低损耗、开关迅速等优点,可高效地用于 300kVA ~ 10MVA 变流器,而不需要串联或并联。串联时,逆变器功率可扩展到 100MVA。以 IGCT 为主功率

器件的电力电子变换装置将逐步取代 SCR 和 GTO,并与 IGBT 为主功率器件的功率变换装置形成强烈竞争的局面。以 MOSFET 为主功率器件的功率变换装置的功率与应用范围将不断扩大。MOSFET 的压降将越来越小,电流密度将越来越高。概括来讲,功率器件的发展有以下几个趋势。

### (1) 将控制与主开关管集成

目前单个模块化的晶闸管可达 1000A/1600V。例如,山东淄博临淄银河高技术开发有限公司用超小型、可移相的脉冲变压器和多路高速大电流集成电路,采用了导热、绝缘性能良好的键合结构,使生产的模块有良好的热疲劳稳定性,用铝铜板和弹性硅胶等材料开发出 SCR 一体化集成智能模块 IIPM。目前,该公司正从模拟移相改进为数字移相,并扩大模块的输出质量。已

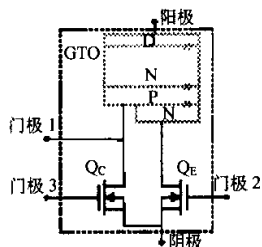


图3 ETO 的工作原理图

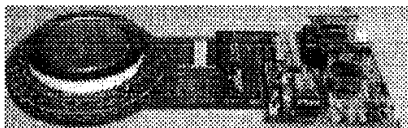


图4 4.5KV ETO 物理外形

能生产单相、三相交流开关模块(最大电流 1000A,最高电压 2200V)和集成移相调控 SCR 整流模块(可达 500A/1800V)。还研制了一些内部置有电压、电流传感器,闭环调节和保护作用的模块。

(2)改进工艺提高性能

例如,用 p-n 相间的窄条状层代替 n-高阻条状层,当厚度小到 1um 时,器件导电电阻下降 50%,这样生产出 Ron 达到几个毫欧的低导电电阻场效应晶体管,可适应同步整流的应用。又如第五代 IGBT,采用微细化技术制造槽结构,这比栅极表面化结构减少了沟道电阻、提高了电流容量 65%。达到了低损耗、高效率的效果。又如,为了得到大容量器件,使 IGBT 与 GTO 结合,称为 IEGT。它是利用强化电子注入 i 层,控制积蓄的载流子数量,并且采用微细化 MOS 沟道结构(达亚 um),使单管容量达到 4500V/1000A,比单管 SCR(1600V/1000A)还高。

(3)探索新概念下的器件研制

过去材料是锗、硅、砷化镓等,现在 SIC 有宽带隙特性,特别适合高功率、高电压、高温和高开关频率的应用。目前已经制做出 70mA/4500V 的 PN 结,可在 300kHz、500℃下工作的 6A/900V 的 Thyristor。用 4H-SIC 制成的 GTO 达到 600~800V 的实用电压,关断脉冲  $t_{off} < 1\mu s$ ,通态压降为 1V,工作温度可达 180℃。今后,这种新型材料也将向 All in one 方向发展,将电、磁元件集成为一个整体模块,即三维多层混合集成,加上微细化技术达到更高水平的一体化。

## 2 开关电源出路在何方

### 2.1 量大利薄难获厚利

开关电源技术较成熟,工艺也易稳定。广东厂家不下 100 家,大的月产量可达 300 万台,产值 2、3 亿。小的则几百台,由于技术已被用到极限,这些厂家都只能在尽力节缩元件成本、减少

人工成本上下功夫,靠薄利争夺市场。或者靠产品特殊专一化(只为某一产品配套)赚钱;如果设计能力差、应变能力不强,则优势不再、好景难继。另外,专一化使开关电源多输出特点丧失殆尽,有违初衷。在广东上亿以上产值的厂家有十来个,但利润很薄。

### 2.2 储备技术,迎接第二高峰

无论 PWM,还是谐振移相技术均仍有较大市场。近年来,中、大厂商均感到市场复苏的气息,个别大厂又说出现订单做不完的好景象。大致看来,一是 IT 行业电源部分更新,IT 行业在西部地区也得到很大发展;还有就是我国开关电源以价廉物美的优势赢得了国际市场。国内有位经理说,“国外电源价格一瓦一美元,对我们来说,即使降一半,我们还有很大的利润空间。”通过前阶段发展表明,为了让开关电源应用面更广,就要有针对性地解决电灯、电镀、电动汽车的 EMI、EMC 问题。这样,才能维持良好的发展势头,例如,广东顺德顺和通信设备有限公司的电镀电源搞得很好,整个厂的生产更上了一层楼,年产值过亿。

### 2.3 开关电源要研究低压、大电流的问题

#### 2.3.1 实现低压、大电流电源的要素

信息电子尤其在通信、计算机系统中,要求大量的 DC-DC 低压、大电流电源。但制作一个电压低至 1V,电流高至 100A 的电源是很困难的。因为 PN 结的零偏压势垒就有大约 0.7V。目前,半导体 IC 的集成度越来越高,而为这些 IC 提供稳定电力的电源部分相对来说集成度不高。电源在整个系统中所占比重过大,开关电源是为解决这个问题而产生并不断发展的。

随着 IC 高度集成化的发展,必然会带来 IC 电源电压的降低。现在主流电压为 3.3V,今后必然会降低到 1V 以下。随着系统功能的增加,要求相应地增加电源功率。为了提高电源功率,输出电流可达到数十至数百安,运算速度的提高要求提供更高动态电流,日本著名教授原田耕介先生预计将达 350A/ms。从电源小型化和保护环境的角度,应使电源的转换效率达到 90% 以上,开关频率应在数百千赫兹以上,才能达到随身携带的小型目的。这时半导体开关元件、磁性元件、电容、布线等的寄生成分所引起的过冲击和噪声会增加电源损失;随着输出电压的降低,纹波电压要求在数十毫伏以下。开关电源必须有技术突破才能满足以上要求。这些突破将是未来技术发展的方向。

(1)从电路和节能方面考虑,需要采取的措施:①采用同步整流技术,②降低低压侧 MOSFET 的导通电阻,③高压侧 MOSFET 实现高速开关④减少待机功耗 ⑤减少磁心损失。

(2)从材料和元器件方面考虑,在减小电源体积方面可以采取的措施:①开关频率的高频化 ②缩短布线,电源模块化 ③减少元器件的数目④除去散热器⑤磁性元件实现高饱和密度⑥提高电池的能量密度。

(3)在提高性能和可靠性方面①低压侧采用软开关 ②高压侧增加容错性,提高可靠性、控制的快速性和安全性。下面介绍几个重要技术。

### 2.3.2 同步整流与 MOSFET

在低压大电流的开关变换器中,适合采用降压(Buck)型电路,为消除整流二极管势垒电压的影响,必然要使用 MOSFET 的同步整流。

图 5 给出的是同步整流基本电路,(a)是共地型电路,(b)是利用变压器的隔离型。输出电流为 20~30A 以下的小功率采用共地型,超过 30A 的大功率采用隔离型。两种情况下,都要求高

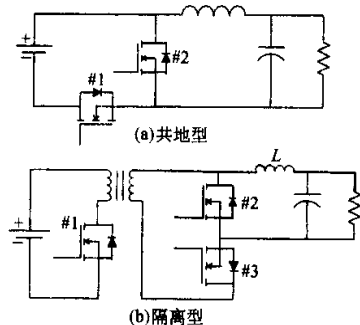


图 5 降压型(Buck)同步整流

压侧的 MOSFET1 具有高速开关特性,对于低压侧的 MOSFET2,出于节能的目的,要求很低的导通阻抗。特别要求其静态电容小,以减小栅源极间电荷影响开关速度而造成的损失。

尽管两个开关管交替导通,但为了防止短路电流,需要设置两个开关管同时处于关断状态的死区区间。在此区间,低压侧的 MOSFET2 工作在第 3 象限,本体二极管导通,储存能量,当 MOSFET1 导通时,产生冲击电流使损失增大,因此,一般要接另一个肖特基二极管。

电路中存在的电感成分,虽然可以有效减轻开关元件在导通时的电流冲击,但是会带来关断时的冲击电压,以及导通时引线电感上的电压降,可以看作是增加了导通阻抗,引起损失的原因。

### 2.3.3 电压纹波与冲击电压

#### (1)电压纹波与 ESR

对于电压在 1 伏以下、电流在 100 安培以上的负载,其负载电阻在 10 毫欧以下,低于滤波电容的 ESR,会出现电压纹波问题。现在,假设可以通过升降压或升压型变换器实现这种电源,但电压纹波率 100%,流过电容的纹波电流在 100 安以上,成为产生巨大损失的原因。对此,降压型变换器中含有串联滤波电感,可抑制纹波电流。但是,负载电阻与 ESR 相当,纹波电流分别流过电容和负载,其动作模式和目前的滤波电路不同。

图 6 是为探讨纹波电压而给出的等效电路。根据  $Crc$  的值,

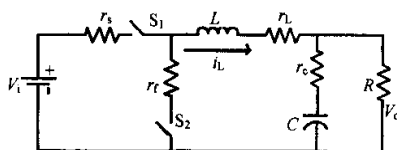


图 6 同步整流降压型基本回路

有 4 种动作模式,见图 7。图 8 的电压纹波值与  $rc/R$  的变化关系曲线,表示出了这 4 种动作模式。C 越大,纹波率就越小。为进一步降低低压大电流输出电压纹波,即减小滤波电容 ESR $rc$  值,必须采取一定的方法和策略。

#### (2)负载突变引起的冲击电压

对于数字电路的负载,为快速响应各种模式的转换,输出电压相应于负载变化的瞬态响应特性就显得非常重要。此时,如果电流的变化率大,冲击产生时间比开关周期  $T_s$  短,则很难期待由反馈而带来的输出电压稳定效果。

为探讨负载急速变化引起冲击电压发生的机理,图 9 给出了基本电路。当负载由重变轻时,会产生很大的冲击电压。为分析此冲击电压,假定通过 MOSFET 对负载实行开关控制,当开关由 ON 向 OFF 转换期间(此时 MOSFET 当作电流源),产生冲击电压。但是,这期间的电流变化被看作是由栅极电压的过渡变化所引起,并假定此过渡变化是按时间常数  $\tau$  的指数函数增长。由此可根据这个期间电流变化所占比率求出相应的电流变化率。

引起冲击电压发生的电感成分由引线电感  $L_p$  和电容等效串联电感  $L_c$  组成。通过计算可求出  $L_p$  的值,也可按 10nH/cm 的经验值来估算。ESL  $L_c$  通常也仅有数 nH。对冲击电压的产生, $L_p$  与  $L_c$  的作用是相同的,因此可用  $L = L_p + L_c$  来分析。

图 10 给出了以  $L_p$  为独立变量,通过仿真计算和实验所得出的冲击电压峰值结果。电流变化率此处设为 77A/us。通过引线长度的改变即  $L_p$  的变化来观察冲击电压,其中  $L_p = 0$  时的冲击电压可看作仅由  $L_c$  引起。即使引线长度为零,仅由 ESL 也可产生冲击电压。

### 2.3.4 省略滤波电容的可能性

如果因负载变化引起输出电压波动,波动持续时间超过开关周期的话,通过反馈可在一定程度上进行调整,L-C 滤波电路对此电压调整效果起决定作用。为达到电压调整目的,必须提高开关频率,减小 L 和 C 值,让截止频率尽量向高频端延伸。

开关频率由 MOSFET 的开关时间所决定,为了提高开关频率,使其超过其极限值,在实用中可采用多相开关方式等效提高开关频率。但是,相数也有限制。另外,变化的原因仅在于负载一侧,让截止频率尽量低也非常有效。为达到此目的,使用电气双层电容滤波器可能是今后的发展方向。当然,为此必须考虑怎样同时降低 ESL 和 ESR。

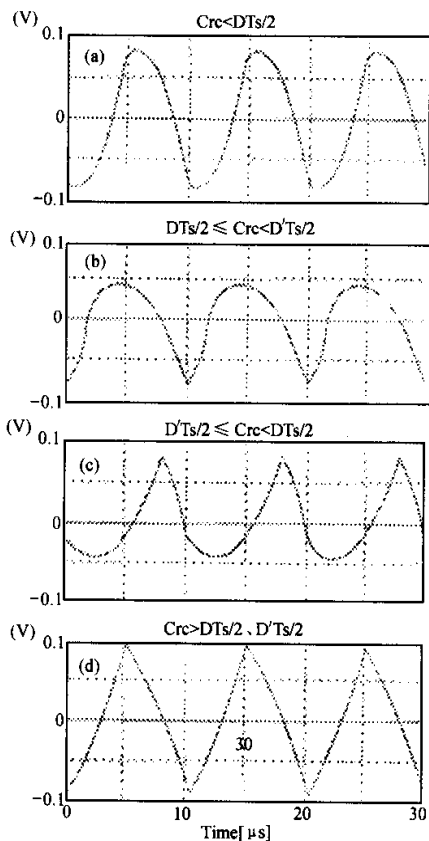


图7 不同  $C_{rc}$  下输出电压纹波波形

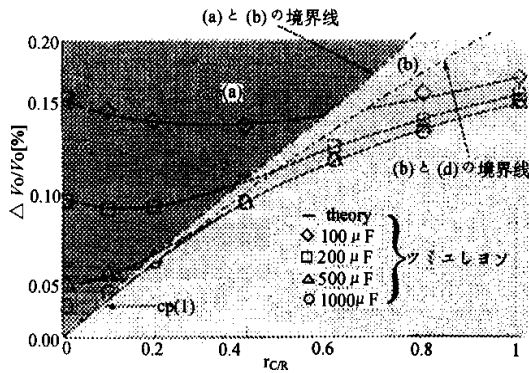


图8 电压纹波与  $\tau_{CR}$  关系曲线

## 2.4 便携式设备与燃料电池

对于手提电脑与手机、数码相机等便携式电器,电源是出问题最多的部分。便携式设备的电源一直以来是传统电池的天下,传统电池在轻便与长时使用性方面,还不能充分满足用户的要求。为此,由固体高分子材料构成的燃料电池最近引起了大

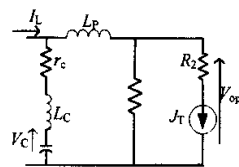


图9 负载急速变化基本电路

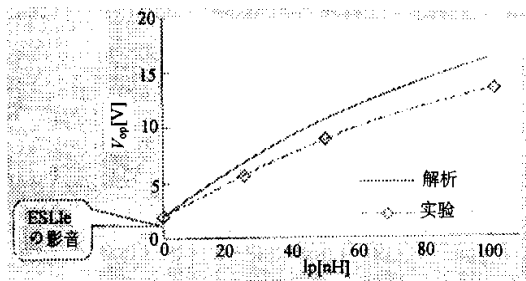


图10 计算和实验所得冲击电压峰值比较

家的关注。燃料电池是以甲醇为燃料,铂为催化剂,其构造为电极间夹电解质膜,能量密度可做到锂电池的10倍。100℃以下的工作温度包括在常温下可以发电,单节电压大概为1~2V。本来用氢作燃料最理想,但从实用出发,用甲醇和铂催化剂的组合较方便,不过其对于负载变化的跟随性有问题,因此为保护电极,需要与电容组合使用。

燃料电池的优点是充电方便,可长时间使用。电能不足时,仅补充燃料即可,不需要长时间充电。

以上就低压、大电流开关电源为中心,对开关电源的未来技术发展方向进行了论述。按照摩尔定律,每18个月IC的集成度会增加2倍,因此很难断定电压会降低到何种程度为止。如果,这种趋势无限制的持续下去的话,可以预想对电源的要求会越来越高。要满足这些要求,首先以开发新的半导体和电容为前提,另外从电路角度来建立元器件微细结构模型也可能成为解决问题的关键点。因此,今后在各种层面上打破学科界线进行协同研究的必要性会越来越高。

## 2.5 大电容技术

超级电容器是电容器方面近年来最新技术进展,国外现已开发生产出多种具有广泛适用范围的超级电容器单元和组件,其单元容量一般为10F,最大到2700F。超级电容器可串联组成超高压组件或并联组成低压高能量存储组件。超级电容器的应用广泛,可以给重要生产部门提供高品质、无波动电源;可以在医院等重要单位停电时作为过渡电源,构成短期不间断电源;还可以作为电动或混合燃料汽车中电池的替代物。

据去年对外考察,俄罗斯电容式转换器效率接近1,应用范围包括地铁、电车等,采用电容储能的18吨试验无轨电车,已可行驶3公里。估计时速100公里以上,转换器自重只有300~

400kg, 电容器很小型的约 300mm<sup>3</sup>, 充电只需几分钟, 比蓄电池快速充电快 4 倍多, 零下几十度可启动电动机, 符合环保标准。被认为是革命性进展。俄罗斯在大电容上的研究水平体现在电压高达 500~550V, 比国内现在研究水平高出 200 倍以上。

## 2.6 电源设备监控

计算机网络在经济和生活中发挥着越来越大的作用, 在发展电子商务和计算机网络过程中, 大家都意识到系统的可用性是最为重要的, 而电力供应的质量和可靠性又是计算机网络可用性最根本的基础。大量案例和统计数据表明, 在影响计算机网络系统可用性的因素中, 电源系统起着非常关键的作用。系统管理员应该能够有效地管理作为整个计算机网络系统基础设施的电源系统。与传统到现场进行巡视和维护做法不同的是, 系统管理员需要在本地或通过远程通讯方式得到电源系统的预警通知、快速诊断电源故障、采取有效措施防止系统因电力问题宕机、以最快速度恢复电力供应等等。这些客观需求促进了电源与计算机网络相结合的电源监控技术的发展。

电源监控技术的核心是监控软件和一些测量和传感附件。通过它们提高了 UPS 及整个电源系统的可服务性、可预测性等。使得系统管理员可借助此了解 UPS/电源系统可能会发生那些问题, 已经发生了那些问题, 正在发生那些问题, 如何采取相应的措施处置、诊断、报警, 以防患于未然等。这一切工作都可以通过可管理性监控软件自动完成。

采用电源监控技术还可以提高电源系统的经济性。传统电源系统的使用、维护、管理、诊断、维修等工作都要由专业电源工程师完成, 而且要在客户现场进行, 所以速度一般较慢、费用难以控制, 而因为电源故障造成的经济损失及其对企业声誉的影响更是难以估计。而通过电源监控系统, 管理员可以在问题未出现之前就将其消灭在萌芽状态; 问题出现后, 能以最快速度采取措施, 即使无人值守时也可以自动执行保护功能。所有这一切, 都可以在相当程度上提高电源系统的经济性。

### 参考文献

- [1] 原田耕介, 构筑新一代 IT 市场的全新电源技术, 日刊《电子技术》, 2002.4
- [2] Xigen Zhou, Zhenxue Xu, Comparison of High Power IGBT, IGCT and ETO for Pulse Applications(CPES2001)
- [3] Peter Steimer, Oscar Apeldoorn, etc, IGCT Technology Baseline and Future Opportunities, IEEE - PES, Oct, 2001.



### 作者简介

张占松, 广东工业大学自动化学院教授, 长期从事电力电子教学、科研、产品开发工作。

(上接第 67 页)

### 参考文献

- [1] 王兆安等,《电力电子技术》, 北京, 机械工业出版社, 2000 年 5 月
- [2] Naresh Thapar, R. Sodhi, K. Dierberger, G. Stojic, C. Blake, and D. Kinzer. MOSFET TECHNOLOGY ADVANCES DC - DC CONVERTER EFFICIENCY FOR PROCESSOR POWER. PCIM 2001
- [3] Sayed-Amr El-Hamamsy. Design of High-Efficiency RF Class-D Power Amplifier. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.9.
- [4] Wojciech A. Tabisz, Fred C. Lee and Dan Y. Chen. A MOSFET Resonant Synchronous Rectifier for High - Requency DC/DC Converter. IEEE 1990

- [5] Nobuhiko Yamashita, Naoki Murakami, Toshiaki Yachi. Conduction Power Loss in MOSFET Synchronous Rectifier with Parallel - Connected Schottky Barrier Diode. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol. 13 1998

- [6] Vitezslav Benda, John Gowar, Duncan A. Grant. Power Semiconductor Devices Theory and Applications. John Wiley & Sons 1999



### 作者简介

郑峰, 男, 1971 年 10 月生, 研究生。研究方向为 DC/DC 变换器的磁路集成和同步整流技术。