

脉宽调制整流电路简介

摘要：脉宽调制整流技术具有非常广阔的应用前景。从功率器件，主电路拓扑和控制方法三个方面对其进行了详细的介绍，并对其未来发展进行了预测。

关键词：脉宽调制整流器；功率器件；电路拓扑；控制方法

引言

随着电力电子技术的迅速发展，各种电力电子装置在电力系统、工业、信息、交通、家庭等众多领域中的应用日益广泛。电力电子装置的非线性，引起网侧电流、电压波形的严重畸变，导致了日趋严重的谐波污染。相关资料表明，电力电子装置生产量在未来的十年中将以每年不低于 10% 的速度递增，由这类装置所产生的高次谐波约占总谐波源的 70% 以上。因此，谐波治理势在必行。

为了抑制电力电子装置产生的谐波，功率因数校正技术应运而生。本文主要对与 PWM 整流器相关的功率开关器件、主电路拓扑结构和控制方式等进行详细说明，在此基础上对 PWM 整流技术的发展方向加以探讨。

1 功率开关器件

PWM 整流器的基础是电力电子器件，其与普通整流器和相控整流器的不同之处是采用了全控型器件。目前在 PWM 整流器中得到广泛应用的电力电子器件主要有如下几种。

1.1 门极可关断晶闸管(GTO)

GTO 是最早的大功率可关断器件，是目前阻断电压最高和通态电流最大的全控型器件，已达 6kV/6kA 的制造水平。它由门极控制导通和关断，具有通过电流大、通态电压低、导通损耗小， dv/dt 耐量高等优点，在大功率的场合应用较多。但是，GTO 的缺点也很明显，诸如其驱动电路复杂并且驱动功率大，导致关断时间长，限制了器件的开关频率；关断过程中的集肤效应容易导致局部过热，严重情况下使器件失效；为了限制 dv/dt ，需要复杂的缓冲电路，这些都限制了 GTO 在各个领域的应用，现在 GTO 主要应用在中、大功率场合。

1.2 电力晶体管 (GTR)

电力晶体管又称为巨型晶体管，是一种耐高压、大电流的双极型晶体管，该器件与 GTO 一样都是电流控制型器件，因而所需驱动功率较大，但其开关频率要高于 GTO，因而自 20 世纪 80 年代以来，主要应用于中小功率的变频器或 UPS 电源等场合。目前其地位大多被绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 和功率场效应管 (PowerMOSFET) 所取代。

1.3 功率场效应管 (PowerMOSFET)

功率场效应管是用栅极电压来控制漏极电流的，属于电压控制型器件，因此，它的第一个显著特点是驱动电路简单，需要的驱动功率小；第二个显著特点是开关速度快，工作频率高。另外，PowerMOSFET 的

热稳定性优于 GTR。但是 PowerMOSFET 电流容量小，耐压低，一般只适用于功率不超过 10kW 的场合。

1.4 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

IGBT 是后起之秀，集 MOSFET 和 GTR 的优点于一身，既具有 MOSFET 的输入阻抗高、开关速度快的优点，又具有 GTR 耐压高、流过电流大的优点，是目前中等功率电力电子装置中的主流器件。目前的制造水平已经达到 3.3kV/1.2kA。栅极为电压驱动，所需驱动功率小，开关损耗小、工作频率高，不需缓冲电路，适用于较高频率的场合。其主要缺点是高压 IGBT 内阻大，通态电压高，导致导通损耗大；在应用于高（中）压领域时，通常须多个串联。

1.5 集成门极换流晶闸管 (IGCT) 和对称门极换流晶闸管 (SGCT)

IGCT 是在 GTO 的基础上发展起来的新型复合器件，兼有 MOSFET 和 GTO 两者的优点，又克服了两者的不足之处，是一种较为理想的 MW 级的高（中）压开关器件。与 MOSFET 相比，IGCT 通态电压更低，承受电压更高，通过电流更大；与 GTO 相比，通态电压和开关损耗进一步降低，同时使触发电流和通态时所需的门极电流大大减小，有效地提高了系统的开关速度。IGCT 采用的低电感封装技术使得其在感性负载下的开通特性得到显著改善。与 GTO 相比，IGCT 的体积更小，便于和反向续流二极管集成在一起，这样就大大简化了电压型 PWM 整流器的结构，提高了装置的可靠性。其改进形式之一称为对称门极换流晶闸管 (SGCT)，两者的特性相似，不同之处是 SGCT 可双向控制电压，主要应用于电流型 PWM 中。目前，两者的制造水平已经达到 6kV/6kA。

2 PWM 整流器的主电路拓扑结构

PWM 整流器根据主电路中开关器件的多少可以分为单开关型和多开关型；根据输入电源相数可以分为单相 PWM 整流电路和三相 PWM 整流电路；根据输出要求可以分为电压源型和电流源型。下面介绍几种常见的三相 PWM 整流电路的拓扑结构并简要分析它们的工作特性。

2.1 三相单开关 PWM 整流电路

三相单开关 PWM 整流器的主电路拓扑结构主要有如下几种。

2.1.1 单开关 Boost 型（升压型）

电路如图 1 所示，其中输出电压恒定，工作于电流断续模式（DCM），这种电路结构简单，在 PWM 整流电路中应用广泛。

2.1.2 单开关 Buck 型（降压型）

电路如图 2 所示，与升压型成对偶关系，其输出电流恒定，输出电压较低，工作于断续电流模式（DCM）。

2.2 三相多开关 PWM 整流电路

三相多开关 PWM 整流器的主电路拓扑结构主要有如下几种。

2.2.1 六开关 Boost 型

亦称为两电平电压型整流器或三相桥式可逆 PWM 整流器。电路如图 3 所示，每个桥臂上的可关断开关管都带有反并联二极管，可以实现能量的双向流动。以 A 相为例予以说明：当 A 相下桥臂中的开关管导通时，A 相储能电感储能；当其关断时，A 相电感储能通过上桥臂的二极管向直流侧释放磁能。因此，从广义上讲，这种桥式 PWM 可逆整流器拓扑，仍属于升压式结构。六开关 Boost 型 PWM 整流器的特点是结构简单且宜于实现有源逆变，因而是目前应用和研究最为活跃的一种类型，也是多开关 PWM 整流电路中应用最为广泛的一种。

2.2.2 六开 Buck 型

也可称为两电平电流型整流器，电路如图 4 所示，直流侧电抗器一般要求很大。由于电流型变换器的特点，交流侧输入 LC 滤波器通常是必不可少的，以改善电流波形和功率因数。这种电路拓扑较适合于空间矢量调制，且有降压作用。其缺点是直流侧大电感内阻较大，消耗功率较大导致其效率略低于六开关 Boost 型。

2.2.3 三电平 PWM 整流电路

在大功率 PWM 变流装置中，常采用拓扑结构如图 5 所示的三点式电路，这种电路也称为中点钳位型 (Neutral Point Clamped) 电路。与两点式 PWM 相比，三点式 PWM 调制波的主要优点，一是对于同样的基波与谐波要求而言，开关频率低得多，从而可以大幅度降低开关损耗；二是每个主开关器件关断时所承受的电压仅为直流侧电压的一半，因此，这种电路特别适合于高电压大容量的应用场合。不过三点式 PWM 可逆整流器的缺点也是显而易见的，一方面其主电路拓扑使用功率开关器件较多，另一方面，控制也比两点式复杂，尤其是需要解决中点电位平衡问题。

从上面的分析可以知道，单开关主电路拓扑结构的共同优点在于，控制结构简单，易于实现，且电源可靠性高；缺点在于其应用场合受到开关器件的影响，开关器件的耐压水平高低和开关频率的高低限制了这种电路的应用，其主要应用于中小功率的变频器或 UPS 电源。

与单开关结构的 PWM 整流器相比，多开关 PWM 整流电路的共同优点在于功率因数高，谐波失真小，可实现能量的双向流动，调节速度快，应用范围宽，主要应用于中大功率场合。缺点也很突出，诸如电路结构复杂，控制难度大，而且需要检测和控制的点较多，提高了控制成本；器件的增多也降低了系统的可靠性。但由于其性能指标要高于单开关结构的 PWM 整流器，且可实现能量的双向流动，是很有发展前途的拓扑结构。

3 控制方式

控制技术是 PWM 高频整流器发展的关键。要使 PWM 整流器工作时达到单位功率因数，必须对电流进行控制，保证其为正弦且与电压同相或反相。根据有没有引入电流反馈可以将这些控制方法分为两大类：引入交流电流反馈的称为直接电流控制 (DCC)；没有引入交流电流反馈的称为间接电流控制，间接电流控制也称为相位幅值控制 (PAC)。

3.1 间接电流控制

间接电流控制就是通过控制 PWM 整流器的交流输入端电压，实现对输入电流的控制。这种控制方法没有引入交流电流控制信号，而是通过控制输入端电压间接控制输入电流，故称间接电流控制。又因其直接控制量为电压，所以又称为相位幅值控制。其原理图如图 6 所示。

间接电流控制引入一个电压环，由电压环得到一个与整流电路输出功率相匹配的输入电流幅值给定。再经过两个乘法器转换成输入电流的有功分量 i_p 和无功分量 i_q ，分别经 R 和 ωL 环节后转换成电压信号再与电源电压相减后，便得到给定电压调制信号，最后与三角波比较产生控制用的 PWM 信号，控制主电路的工作。这种控制方式的电路简单，但由于缺少了电流环，响应速度受到一定程度的影响。另外，用到了电路参数 R 及 L ，电路参数与给定参数一致性较差，也会影响控制的精度。

3.2 直接电流控制

与间接电流控制相反，在控制电路中引入交流输入电流反馈信号，对输入电流进行直接控制，称为直接电流控制。根据电流跟踪方法的不同，直接电流控制可分为滞环电流比较法控制、定时瞬时电流比较法控制和三角波电流比较法控制等。

3.2.1 滞环电流比较法控制

图 7 所示为滞环电流比较法控制的原理图。以其中 A 相进行说明，基本工作原理是电压调节器输出与和电源电压同相位的单位正弦信号相乘得到 A 相电流参考信号 i_A^* ， i_A^* 再与检测到的 A 相电流信号 i_A 比较，经过滞环产生 PWM 调制波，对各开关器件进行控制，达到控制电流与电压完全同相或反相的目的。

滞环电流比较法控制实现很方便，控制简单，且控制误差可由滞环宽度调节，若设计合适可达到较高的控制精度，故实际应用较广。在使用中，器件开关频率取决于滞环宽度，导致器件的开关频率较大，造成器件选择较难且滤波器的设计复杂。

3.2 定时瞬时电流比较法控制

图 8 所示为定时瞬时电流比较法控制的原理图。定时瞬时电流比较法控制与滞环电流比较法控制类似，都包括电压、电流反馈且 PWM 调制波产生方法也相同。不同之处是，引入时钟信号定时将反馈电流与指令电流进行比较，产生 PWM 调制波控制开关器件的通断，保证电压、电流的同相位，且器件的开关频率固定。

定时瞬时电流比较法控制可有效克服滞环电流控制开关频率变化的缺点，使开关频率固定，但电流跟踪误差受到电网电压影响，且控制电路要比滞环电流比较法复杂。

3.2.3 三角波电流比较法控制

图 9 所示为三角波电流比较法控制的原理图。与前面两种控制方法类似，电路中也包括电流滞环和电压环，电流指令由电压环 PI 输出和一个与电压同相的单位正弦信号相乘得到，指令电流和反馈电流经电流调节器后与三角波信号比较后，得到控制用 PWM 调制波，控制开关器件的通断，实现输出电流跟踪指令电流。三角波电流比较法控制也具有开关频率固定的优点，且单一桥臂的开关控制互补，为建模分析提供了方便，从而可方便地实现系统的谐波分析；在结构上，其控制电路比定时瞬时电流比较法控制简单，因而具有广阔的应用前景。

在直接电流控制中直接检测交流侧电流信号加以控制，系统响应快，动态响应好，但检测量过多，控制复杂。间接电流控制从稳态相量关系出发进行电流控制，尽管动态响应较慢，但其具有结构简单、检测量少、控制简单、概念清晰的特点，可得到最优的性能价格比。

4 结语

通过上述分析，PWM 整流技术的应用会越来越广泛，其发展也会呈现出多种趋势，但主要归结为三个方面：功率器件、主电路拓扑和控制方法。

- 1) 新型全控型器件的发展器件是 PWM 整流技术赖以实现的基础，新技术的出现和新材料的应用，必然会产生更新、更好的功率器件，从而推动 PWM 整流技术的发展。
- 2) 主电路拓扑 PWM 整流器的最大优势就是对电网的影响较小，为了进一步降低影响，提高功率因数，人们必然会对整流器的拓扑结构进行改进，现在已经出现五电平、七电平结构，随着功率器件和应用水平的提高，必然会有更新、更好的电路拓扑结构出现。
- 3) 控制方法一方面，主电路拓扑的多样化，必然会引起控制方法的变异，甚至会产生更新、更简单的控制方法；另一方面，现代控制理论和计算机技术的发展也为新的方法的出现奠定了坚实的基础，现在状态反馈控制、变结构控制已经开始应用到 PWM 整流器的控制中来。

信息来源：电源技术应用 陈 荣

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>