

低谐波注入的大功率三相整流电路*

王 群¹ 耿云玲^{1,2} 姚为正³

(1. 国防科技大学炮兵学院 湖南 长沙 410112 2. 湖南大学电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082 ;
3. 湖南工程学院电气工程系 湖南 湘潭 411101)

摘 要 给出了三相桥式 PWM 整流电路主电路 ,分析了其实现单位输入功率因数和不对电网注入谐波的工作原理。在此基础上 ,提出了一种新型大功率三相 PWM 整流电路系统结构 ,其主电路采用了双模块并联的方式。与此同时 ,还探讨了其控制方法和相应的控制系统以及 IGBT 的驱动保护电路等。最后对所研制的容量为 100kW 的实验样机进行了实验研究 ,结果证实了它的良好性能。

关键词 :谐波 ;功率因数 ;PWM 控制 ;整流电路

中图分类号 :V434 **文献标识码** :A

On Low Harmonic-Injected High Power Three-Phase Rectifier

WANG Qun¹ , GENG Yun-ling^{1,2} , YAO Wei-zheng³

(1. Artillery Academy , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410112 , China ; 2. Hunan University ,
Changsha 410082 , China ; 3. Hunan Institute of Engineering , Xiangtan 411101 , China)

Abstract : The main circuit of three-phase bridge PWM rectifier is introduced , and the operational principle by which it realizes unit input power factor and does not pour harmonics into power network is analyzed. On the base of those , a new system configuration for high power three-phase PWM rectifier , whose main circuit consists of parallel two modules , is proposed , and its control approach and corresponding control system as well as the driving and protective circuit are discussed. Finally , the experiment for the prototype of capacity 100kW is investigated. The results show the good performance of the three-phase high power PWM rectifier presented.

Key words : harmonics ; power factor ; PWM control ; rectifier

含有电力电子开关器件的整流器以及输入端为整流电路的变频器和不间断电源(Uninterrupted Power System ,UPS)等都是电网中常用电力电子变流装置。它们完成了对电网输入正弦交流电压进行变换成的任务。然而 ,无论是不可控二极管还是相控整流电路工作时其交流输入电流都要发生畸变 ,变为非正弦波并产生谐波 ,使输入功率因数降低。随着电力电子技术的不断发展 ,整流电路的应用场合和容量无疑都将日益增长 ,因而它们向电网注入的谐波电流越来越多 ,给电网带来的谐波污染越来越严重 ,对电网造成的危害也越来越大^[1]。所以 ,抑制整流器所产生的谐波有十分重要的意义。

应该说 ,通过无源和有源电力滤波器等谐波抑制或补偿装置能抑制或补偿整流器等电力电子变流装置在电网中产生的谐波和无功功率^[1] ,但只是一种补救性的、消极的和被动的“治病”措施。更为有效和积极的途径是在变流装置中采取消除或减少谐波的所谓“防病”措施。为此 ,就应该开发包括整流器在内的新型电力电子变流装置 ,使其在使用时对电网既不产生谐波也不消耗无功功率 ,即输入功率因数为 1 ,成为对电网无谐波污染的“绿色”电力电子变流装置。为此 ,本文采用高频脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation ,PWM)整流技术和模块并联扩容技术相结合的方法 ,设计了一种输入功率因数接近 1、流入电网的电流基本为正弦波、低谐波注入的大功率三相 PWM 整流电路。

* 收稿日期 :2002 - 03 - 12
基金项目 :国防科技大学资助项目(CX00 - 07 - 009)
作者简介 :王群(1960—)男 ,副教授 ,博士。

1 主电路结构和工作原理

从电路形式上看, PWM 整流器主电路和一般整流器主电路一样, 不同的仅仅是控制方式^[2,3]。因为要研制大功率整流器, 所以采用如图 1 所示的主电路结构作为三相 PWM 整流器主电路。从其拓扑结构看, 它属于全桥电压型的 PWM 整流器。图中, u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 分别为电网的三相输入电压(电源电压), 一般情况下它们为平衡且对称的理想电压源。为了减小开关器件高频通断所产生的高次谐波和浪涌电压, 在电网与整流器主电路之间连接有三角形接法的电容 C ; 也可以是不同类型的高通滤波器。 L 是交流侧电感, 主要作用是限制开关器件所产生的高次谐波电流, 其取值应该适当; 太小会使电源电流中的高次谐波含量增加, 太大将影响控制时电源电流跟踪指令信号的速度^[3]。 C_d 为直流侧滤波电容, 其主要功能有两个: 一是减少开关器件高频开关动作在输出直流电压中造成的纹波, 二是当负载发生变化时, 在整流电路的惯性延长时间将输出直流电压的波动维持在限定范围内。主电路直流侧输出电压为 U_d 。这里根据装置容量、工作频率和 PWM 整流技术需要, 主电路所用的开关器件 VT_{*i*} ($i = 1, 2, \dots, 6$) 均采用开关频率高、开关损耗小的自关断器件 IGBT, 它们分别带有反并联二极管。

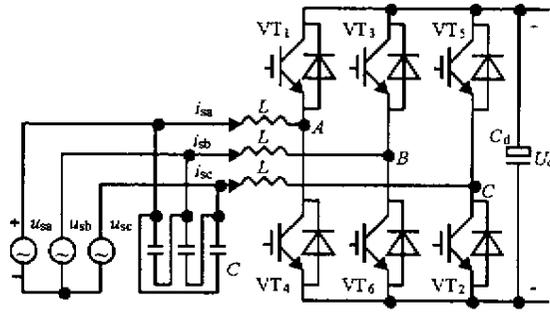


图 1 主电路结构

Fig. 1 Configuration of main circuit

一般情况下, 尽管整流电路输入电压为正弦波, 但工作时其输入电流会发生畸变, 成为非正弦波, 从而产生谐波^[1]。输入电流中含有的谐波多少与电路的控制方式有关。采用 PWM 控制可以大大减少输入电流中谐波的含量。同正弦 PWM (Sinusoidal PWM, SPWM) 逆变电路控制输出电压时的情况相类似^[4], 可在图 1 所示的 PWM 整流电路交流侧输入端 A、B 和 C 的每个端子之间分别产生一个正弦波调制的三相 PWM 电压 u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 。它们除了含有与电源同频率的基波分量外, 还含有与开关器件开关频率有关的高次谐波分量。考虑到 L 的滤波作用, 这些高次谐波分量在交流侧三相输入电流 i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 中产生的脉动将很小。如果忽略它们, i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 为频率与电源电压频率相同的三相正弦电流。从图 1 可知, 当 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为平衡和对称的三相电压时, PWM 整流器的工作方程为

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_{sa}}{dt} + Ri_{sa} &= u_{sa} - \frac{1}{3}(u_{AB} - u_{CA}) \\ L \frac{di_{sb}}{dt} + Ri_{sb} &= u_{sb} - \frac{1}{3}(u_{BC} - u_{AB}) \\ L \frac{di_{sc}}{dt} + Ri_{sc} &= u_{sc} - \frac{1}{3}(u_{CA} - u_{BC}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, R 为包含电源内阻和线路电阻在内的交流回路等效电阻。由式(1)可知, 在 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 以及 L 、 R 一定时, i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 只与 u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 有关, 也就是说 i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 的幅值和相位将由 u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 中基波分量的幅值及其与电源电压的相位差来决定。改变 u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 中基波分量的幅值和相位, 就可以使 i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 分别与 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 同相位, 电路不仅工作在整流状态, 而且能使三相输入电流成为与三相输入电压变化一致的正弦波, 从而实现了整流电路的输入功率因数近似为 1 和它对电网基本不产生谐波的设想。这就是低谐波注入的三相 PWM 整流电路的基本工作原理。

2 系统构成

根据上述三相 PWM 整流电路的工作原理,对中小功率容量的整流电路,要实现输入功率因数近似为 1 且对电网的谐波注入很小,它们的主电路可直接采用图 1 所示的结构。但对大容量整流电路,为弥补开关器件容量的不足,可采用多个整流模块并联的方式来组成整流器主电路。图 1 所示的三相 PWM 整流器主电路开关器件采用 IGBT,而 IGBT 的电流容量有限,为实现大功率三相 PWM 整流的目的,可采用双模块并联扩容的方法。由此提出一种大功率三相 PWM 整流电路的系统结构如图 2 所示。其主电路由两个模块并联组成,每个模块即为一个图 1 所示的三相 PWM 整流器主电路。为保证正常工作,模块并联时不论是在静态还是在动态,必须使两个模块均分负荷。否则,将会烧坏模块。

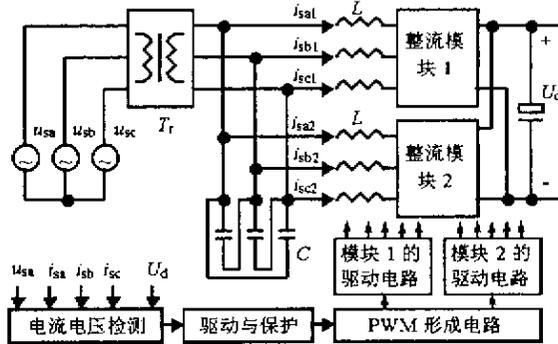


图 2 三相 PWN 整流电路系统结构

Fig.2 System configuration of three-phase PWM rectifier

为使整流电路工作时能够实现输入功率因数近似为 1 且对电网的谐波注入很小,还必须引进适当的控制方法和建立相应的控制系统^[4]。考虑到减少所用元件和简化电路结构,图 2 所示的系统中两个并联模块共用一个控制系统,并且对应桥臂的开关器件 IGBT 的通断控制也完全相同。如此以来,由于两个模块的交流输入、直流输出和控制方式等均相同,所以只要输入滤波电感 L 的参数相同,就可以使两个 PWM 整流主电路均分负荷。况且, L 在工作时还能起到动态均流的作用。

三相全桥 PWM 整流电路正常工作,要求其主电路直流侧电压 U_d 必须大于交流侧输入线电压的峰值^[1,2]。为了使所研制的三相 PWM 整流电路同时能用作变频器和 UPS 等一些变流装置的输入整流电路,就要使其直流输出电压在 288V ~ 414V 范围内可调。对于三相输入线电压为 380V 的 UPS,其线电压峰值大于 280V,不满足三相 PWM 整流电路正常工作的条件。所以,在图 2 所示系统中采用自耦变压器 T_r ,先将三相输入电压降低以后再输入到 PWM 整流电路。 T_r 的变比为 380/190V,这样,当输入电压在允许的范围变化时,均能满足三相 PWM 整流电路的电压变换条件。

3 控制方法及相应的控制系统

对所提出的三相 PWM 整流电路采用双环控制方法。相应的系统控制原理框图如图 3 所示。其外环为直流电压控制环,而内环为交流输入电流控制环。直流输出电压给定信号 U_d^* 和实际的直流电压 U_d 比较后的误差信号先送入 PI 调节器,其输出即为整流电路交流输入电流的幅值。它分别与同步锁相环产生的、相位彼此相差 120° 的三个标准正弦波相乘后,形成整流器交流输入电流的给定信号 i_{sa}^* 、 i_{sb}^* 和 i_{sc}^* 。它们与实际的 i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 比较后得到电流的误差信号,经比例调节器放大后送入比较器,再与三角波发生器所产生的三角载波信号比较后形成整流电路的 PWM 控制信号。这些信号经驱动电路处理后再去驱动主电路模块中的 6 只 IGBT 开关器件,从而使实际的交流输入电流跟踪其相应的指令值,同时达到控制输出电压的目的。由于输入电流指令为相差 120° 的三个标准正弦波,从而使整流装置流入电网的电流最终为三相对称的正弦波。

在进行交流输入电流控制时,如果将总的交流输入电流引入反馈控制,则电压环的输出即为总的

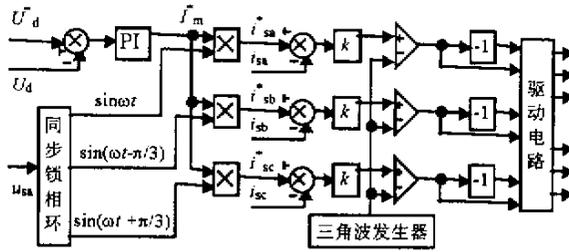


图3 控制系统结构

Fig.3 Configuration of control system

交流输入电流的幅值。如果将其中一个模块的输入电流引入反馈控制,则电压环的输出即为单个模块的交流输入电流的幅值。在图2所示的三相PWM整流器中采用后一种电流反馈控制方式。因为主电路的两个模块的电路结构、参数与控制方法等相同,所以控制其中一个模块的电流,便可以使另一模块的电流与之相同,从而达到控制总电流的目的。即使两个模块的电路参数稍微存在偏差,但在输入滤波电感L的均流作用下,也能使两模块电流基本相同。



图4 标准正弦发生电路

Fig.4 Generating circuit for standard sine signal

关于图3所示控制系统中产生标准正弦波的同步锁相环,采用锁相电路和计数寻址查表方式。其电路结构如图4所示。电源电压先通过过零比较后,依次经过锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)和计数器加以处理,然后进入EPROM,最后经数模转换输出与电源电压同步的标准正弦波信号。图4中的EPROM用于存放正弦波曲线。

4 IGBT的驱动与保护电路

虽然IGBT是一种性能优良的高速开关器件,但为充分发挥其性能,还应该保证其外围电路(包括驱动电路)很好地配置。此外,当系统发生故障时,为使IGBT不受到损坏,应及时对其进行保护,这也是驱动电路应同时具备的功能之一。考虑到驱动电路的可靠性,可对IGBT采用集成驱动电路。图2所示电路的IGBT集成驱动电路将采用日本三菱公司生产的M57962L驱动模块。该驱动模块为混合集成电路,它将IGBT的驱动和短路(过流)保护集于一体,能驱动容量为1200V/400A以下或600V/400A以下系列的IGBT。其最高工作频率高达40kHz,承受2500V的有效值电压可达1分钟。图5即为IGBT驱动电路的接线图,M57962L驱动模块外接一个+15V电源和一个-10V电源,以便提供IGBT所需要的+15V栅极开通电压和-10V栅极关断电压。图中,U_{in}为高电平时IGBT导通,为低电平时它关断。IGBT集电极通态饱和压降与集电极电流成正比,它越大,则通态饱和压降也越大。因此,根据通态饱和电压就能确定流过IGBT电流。驱动模块一旦检测到集电极电压大于规定值,则认为过流故障发生,立即就封锁IGBT驱动脉冲并关断IGBT,同时给出过流故障信号。图中的TLP521-1是M57962L驱动模块内置的一个光耦,它能对主电路和控制电路实行电气隔离。

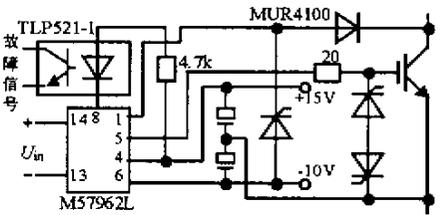


图5 IGBT驱动电路

Fig.5 Driving circuit for IGBT

应该注意的是,IGBT在关断时,较大的电流变化率di/dt将在线路分布电感作用下对IGBT产生过高的开关浪涌电压,此电压一旦超过IGBT能承受的电压,IGBT就容易被击穿而损坏。另外,在开关过程中,如果电压变化率du/dt过大,则会产生擎住现象,使IGBT失控,引起上下桥臂直通。因此,必须采取措施来保证IGBT安全可靠地运行。采用适当的RC缓冲吸收电路就能抑制IGBT在关断过程中产生的过电压和du/dt,同时减少IGBT的关断损耗。

5 实验结果

采用前面所给出的电路结构和控制方法,本文研制了一台容量 100kW 的大功率三相 PWM 整流电源实验样机,并进行了相应的实验研究。IGBT 采用日本三菱公司生产的 400A/600V 模块,输入滤波电感 L 的参数为 $130\mu\text{H}/150\text{A}$,滤波电容的值为 $30\mu\text{F}$ 。为了降低开关损耗,三相 PWM 整流电路的开关频率选取为 8kHz 。

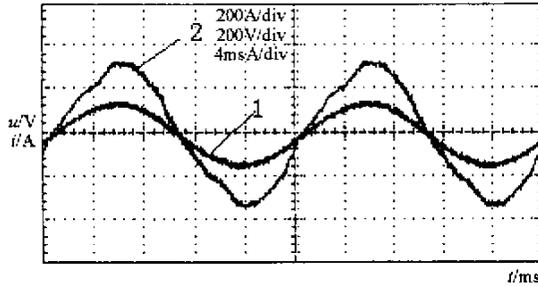


图 6 A 相输入相电流和相电压

Fig.6 Input current and voltages for phase A

实验时采集的三相 PWM 整流电路 A 相输入电流的波形(波形 1)如图 6 所示。通过谐波分析得知,A 相输入电流的总畸变率 THD 为 2.1%,非常接近理想正弦波了。为便于比较,图 6 还显示了 A 相输入相电压波形(波形 2)。可以看出,输入电流不仅近似为正弦波,而且与输入电压同相。工作在额定负载下,采用 PM300 电力分析仪测得三相 PWM 整流电路输入功率因数为 0.99,很接近单位功率因数 1。实验时还对大功率三相 PWM 整流器主电路的两个模块的输入电流分别进行了测量,表 1 给出测量结果。从表中可以看出,流入两个模块的三相电流差别不大,基本对应相等,说明采用模块并联扩大装置容量的方法是可行的。

表 1 主电路模块的输入电路

Tab.1 Input currents for main circuit modules

	模块 I(A)	模块 II(A)
A 相输入电流	40.2	40.8
B 相输入电流	40.4	40.9
C 相输入电流	40.1	40.5

6 结束语

开发和研制交流侧输入电流接近正弦波、单位或高输入功率因数的电力电子变流装置,从根本上解决它们对于电网的谐波污染问题,这是今后包括整流器、变频器和 UPS 在内的电力电子变流装置发展的一个重要趋势。本文提出的新型大功率三相 PWM 整流电路具有输入功率因数高、输入电流接近正弦波和对电网的谐波污染小的特点,可以取代传统的三相相控整流电路,并用作大功率不间断电源的输入整流电路。本文研究将为大功率 PWM 整流电路的实用提供重要参考。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [2] Ohnuki T, Miyashita O. High Power Factor PWM Rectifier with an Analog Pulse Width Prediction Controllers[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(3): 460 - 465.
- [3] 董晓鹏,王兆安.三相电压型单位功率因数 PWM 整流器的研究[J].电力电子技术,1997,16(4): 39 - 41.
- [4] 毛鸿,吴兆麟.功率因数校正器的控制策略综述[J].电力电子技术,2000,19(1): 58 - 60.

