

# 基于谐波消除 PWM 的 RMOS 逆变器的研制<sup>\*</sup>

庄圣贤<sup>\*\*</sup> 李学宁 李肇基<sup>2</sup>

(电子科技大学微电子所 成都 610054)

**【摘要】** 根据规则采样 PWM 的谐波消除原理,提出了一种适于单片机实现的三相 PWM 算法,并用新型功率器件 RMOS 研制出谐波消除 PWM 逆变器,通过仿真分析和实际运行验证了 PWM 中的谐波消除效果。

**关键词** 脉宽调制; 谐波; 逆变器; 矩形槽栅功率半导体

**中图分类号** TM921.51

PWM (Pulse Width Modulation) 的谐波分析和消除一直是人们所重视的问题<sup>[1]</sup>。减少 PWM 中的低次谐波含量通常有两种方法:一种是增加开关频率与基波频率的比值<sup>[2]</sup>;另一种是优化 PWM 中的开关位置,即解一组非线性超越方程或 Jacobi 矩阵<sup>[3,4]</sup>,但其求解及实现均相当困难,特别是在频率和幅度均需可调时,即使是预先计算好开关角度来查表,然而要得到连续的频率和幅度控制,需采用复杂的表内插值算法,因而难以在逆变器中采用。文献<sup>[5]</sup>给出了一种基于规则采样的 PWM 谐波消除法。用这种方法得到的开关角度与给定频率、电压的关系是两个简单的三角方程,且能够在整个电压和频率范围内(包括准方波)对逆变器进行控制,很适合于在逆变器中采用。文献<sup>[6]</sup>给出了 PWM 的基于 Transputer 的算法及实现。鉴于 Transputer 主要用作系统运算和控制,价格昂贵,不能满足逆变器高性能、小型化和低成本的要求,本文提出了谐波消除 PWM 的单片机实现方法,并用自行开发的新型功率器件 RMOS (Rectangular Groove Gate MOS) 研制了新的逆变器,通过对 PWM 算法及主电路的仿真分析和逆变器的实际运行,证明了基于谐波消除 PWM 的 RMOS 逆变器在较小功率的交流传动装置中具有较好的运行效果。

## 1 谐波消除 PWM 算法

对两个设定好的以电压调制系数  $M$  为振幅的正弦波  $M\sin(\omega t + \Phi_1)$  和  $M\sin(\omega t + \Phi_2)$  同时进行规则采样,用得到的采样值分别调制 PWM 脉冲的上升和下降沿。通过对数值法得到的谐波消除 PWM 的开关轨迹进行拟合。在电压调制系数为  $0 \sim 0.8$  时,要使规则采样 PWM 中的低次谐波含量最小, PWM 脉冲的上升沿和下降沿时刻分别由下两式决定:

对上升沿,  $k$  为奇数,且  $1 \leq k \leq N$ ,

$$\alpha_k = \frac{T}{2} \left[ k + 1 - M \sin \left( \frac{(k+1)}{2} \omega T + \Phi_1 \right) \right] \quad (1)$$

对下降沿,  $k$  为偶数,且  $2 \leq k < N$ ,

1997年3月20日收稿

\* 国防科工委“九五”预研基金资助项目

\*\* 男 32岁 博士生

$$\alpha_k = \frac{T}{2} \left[ k + M \sin \left( \frac{k\omega T}{2} + \Phi_2 \right) \right] \quad \text{V} \quad (2)$$

其中  $N$  为四分之一周期中的槽口数。

$$T = 2\pi/3(N + 1)$$

$$\Phi_1 = NT/2$$

$$\Phi_2 = T/4$$

当调制系数  $M > 0.8$  时, 开关角度呈非线性变化, 要使总的谐波电流畸变 THD 最小, PWM 脉冲的调制中心须按下式进行调整。

$$T^* = \frac{T}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{x^2 \pi}{2} \right) \right] \quad (3)$$

其中  $x = (M - 0.8) / 0.4, 0.8 < M \leq 1.23$

对设定好的输出频率  $f$ , 电压调制系数  $M$ , 选择适当的四分之一周期内的槽口数  $N$ , 就可确定出采样周期  $T$ , 初始相位  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$ , 按式(1)、(2)求出开关角度  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 。当  $N \geq 3$  时,  $\alpha_k (1 \leq k \leq N)$  均在  $60^\circ$  之内, 由于 PWM 波形在  $0 \sim \pi$  内以  $\pi/2$  为中心对称, 而在  $0 \sim 2\pi$  内以  $\pi$  为中心反对称, 因而只需存贮  $\Delta t_1 = \alpha_1, \Delta t_2 = \alpha_2 - \alpha_1, \dots, \Delta t_N = \alpha_N - \alpha_{N-1}, \Delta t_{N+1} = 180^\circ - \alpha_N$  等  $N + 1$  个间隔值。根据 PWM 对称和反对称的关系推算出其余  $3N + 1$  个脉冲间隔值。一相 PWM 的推算过程如图 1 所示。在一个周期内共有  $4N + 2$  个开关角度, 后  $3N + 1$  个开关角度的间隔值分别为:

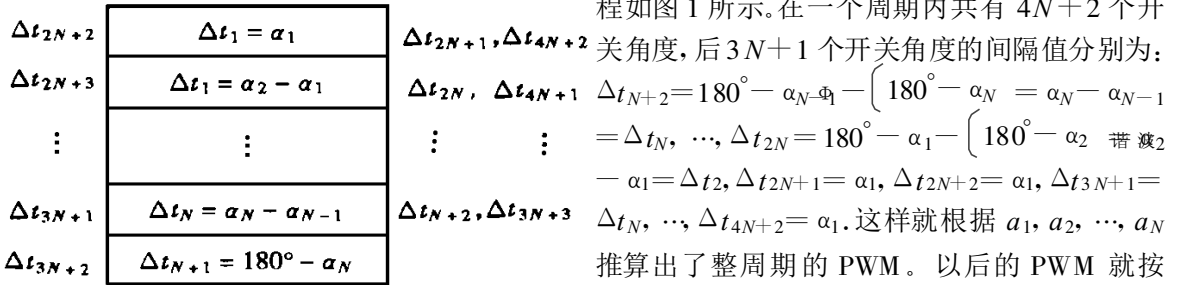


图 1 PWM 推算过程

这样就根据  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$  推算出了整周期的 PWM。以后的 PWM 就按图 1 重复推算。

如把上面得出的 PWM 作为 A 相的 PWM, 则 B 相、C 相的 PWM 分别比 A 相滞后  $120^\circ$  和  $240^\circ$ 。因  $\alpha_N \leq 60^\circ$ , 故 B 相 PWM 的第一个开关角度应为  $180^\circ - \alpha_N - 120^\circ = 60^\circ - \alpha_N$ , 此后的开关角度即按图 1 从  $\Delta t_{N+2}$  处循环递推。同理, C 相 PWM 的第一个开关角度为  $360^\circ - \alpha_N - 240^\circ = 120^\circ - \alpha_N$ , 其余开关角度按图 1 从  $\Delta t_{3N+3}$  处递推。

## 2 RMOS 逆变器设计

我们研制的谐波消除 PWM 逆变器的电路原理如图 2 所示, 主电路由整流硅堆和逆变桥组成。其中逆变桥中的功率器件采用了自行研制的矩形槽栅功率 MOS 器件 (Rectangular Groove Gate MOS), 它是国外 80 年代中期以来继 VDMOS 之后发展起来的一种新型功率 MOS 器件, 其工作电压为 200 V, 单管电流可达 40 A。与 VDMOS 器件相比, 它具有 VDMOS 的诸多优点, 如为场控多子器件, 无少子存储效应, 工作频率高 (RMOS 工作频率可达 100 kHz 以上), 开关时间短, 热稳定性好, 安全工作区宽等。在相同的工艺条件下, RMOS 的单元尺寸可以做得很小, 由于采用矩形槽栅, 有很高的沟道密度和很大的接触面积, 其比导通电阻  $R_{on}$  大大降低, 是 VDMOS 三分之一左右。同时, RMOS 的矩形槽栅不存在大电流下的准饱和区, 具有更低的饱和压降, 因而, 降低了器件的通态损耗。与 IGBT 相比, RMOS 的关断时间小于 IGBT 的十分之一, 大大降低了器件的开关损耗, 使主回路中可以省去辅助开关网络。此外, RMOS 不存在 IGBT 的动态闭锁以及通态电流具有

负的温度系数等,均使器件在  $di/dt$ ,  $dv/dt$  下的可靠性提高。当 RMOS 应用在小功率的变频器中时,可大大提高逆变器的开关频率,降低开关损耗,并使主回路电路简化,体积减小,可靠性提高。

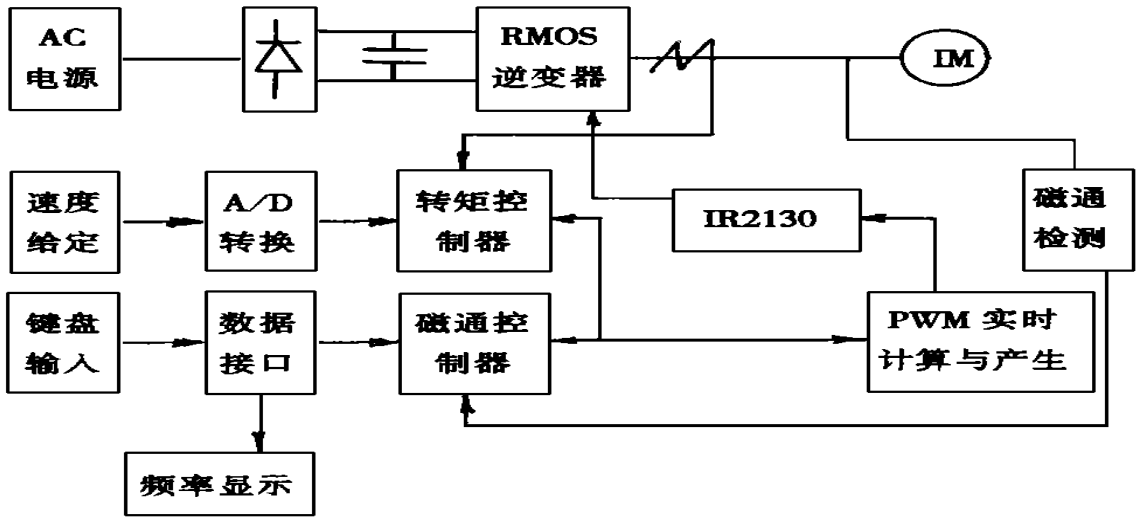


图 2 RMOS 逆变器电路及控制原理

逆变器中功率 RMOS 和单片机的接口采用的是单片 SPIC 芯片 IR2130,实现了对功率器件的驱动以及欠压,过流自动保护等功能的一体化。在高频开关状态下,桥臂结构的中点  $dv/dt$  很大,为避免 RMOS 的 Miller 电容效应引起的低端管子的误导通,在低端管子的栅串联电阻上设计了并联的钳位二极管。

逆变器的控制是由两个 CPU 来完成的。主 CPU 完成速度给定的采样、参数的输入、频率的显示以及转矩、磁通等的计算,从 CPU 则完成谐波消除 PWM 的实时计算与产生,这样,把磁通、转矩控制与谐波消除 PWM 相结合,不但使逆变器输出中的谐波含量减少,而且实现了转矩的瞬时调整,使系统具有快速的动态响应。

为了适应不同的负载,系统增加了转矩限定、转差补偿控制、瞬时电源故障后的平稳恢复以及自动加/减速控制等功能。根据转矩进行电机转差计算并补偿速度,省去了电机的速度反馈回路,同时,在负载产生扰动时,能保持电机速度的恒定。为了有较宽的调速范围,在电机额定频率以下采用的是最大转矩结合磁通恒定的控制方式,在额定频率以上采用弱磁恒功率控制。为了合理地消除谐波,又尽量减少开关次数,降低开关损耗以及实现的难度,取基频范围内四分之周期的槽口数  $N$  在 3~31 之间变化。三相 PWM 是由 8098CPU 的三个软件定时器分别定时产生,从 HSO 高速输出驱动 IR2130。

### 3 结果与讨论

根据谐波消去法 PWM 原理,我们首先对  $N=3$  及  $N=5$  时按式(1)、(2)计算得到的 PWM 用 PSPICE 进行了谐波分析,傅里叶频谱分析的结果表明(如图 3 所示):当  $N=3$  时,PWM 中消除了 5,7 次谐波;当  $N=5$  时,PWM 中消除了 5,7,11,13 次谐波,并且效果明显优于前者。由于三相对称负载中,3 的倍数次谐波能自行消除,因而当  $N=3$  时,对运行有影响的只是 11 次及以上谐波; $N=5$  时,则是 15 次及以上谐波。图 3 中出现的三角形纹波是由于在用 PSPICE 分析时,时域中取的点数不够多造成的,在分析时,考虑到主机的内存容量和运行速度,只输入了 PWM 波形的前四个



图 3 N=3 时 PWM 的频谱图

周期。在作谐波分析时,运行的步长越小(但要保证收敛),点数越多,则频谱中纹波越小且向各频率点靠近。图 4 是取  $N=13, f=40\text{ Hz}$  时,由单片机产生的一相 PWM 波形。很显然, PWM 波形满足  $0\sim\pi$  对称而  $0\sim2\pi$  反对称的关系。随着槽口数  $N$  和频率  $f$  的增加,开关角之间的间隔越来越小,当槽口数取在 51 以上,输出频率在 50 Hz 以上时,最小的开关角之间的间隔只有数微秒。这样的三相 PWM,用单片机来实现是很困难的,由于三个软件定时器公用一个中断源,在运行时会引起相互竞争,时间长了会产生相序混乱,甚至死机。因此,适当选择槽口数  $N$  与输出频率  $f$  之间的关系是很重要的。

但要彻底解决三相 PWM 产生错乱的问题,只有研制具有三个独立的软件定时功能,又能从公用数据区自动取数的专用集成电路,这是我们下一步研究的课题。由 IR2130 自动实现的死区延迟大约为  $2\ \mu\text{s}$ ,对 RMOS 管,开关时间小于 150 ns,因此由 IR2130 产生的死区延迟能保证管子安全通断。图 5 是  $N=11$  时,电机的相电流波形,为了反映真实的谐波消除效果,逆变器的输出没有滤波,电机也选择得很小。实际的运行结果表明,槽口数  $N$  的增加使相电流中的低次谐波分量减少。当调制系数  $M>0.8$  时,也能保证使总的谐波电流畸变(Total Harmonic Distortion)较小,这与文献[5]中理论分析的结果是基本一致的。

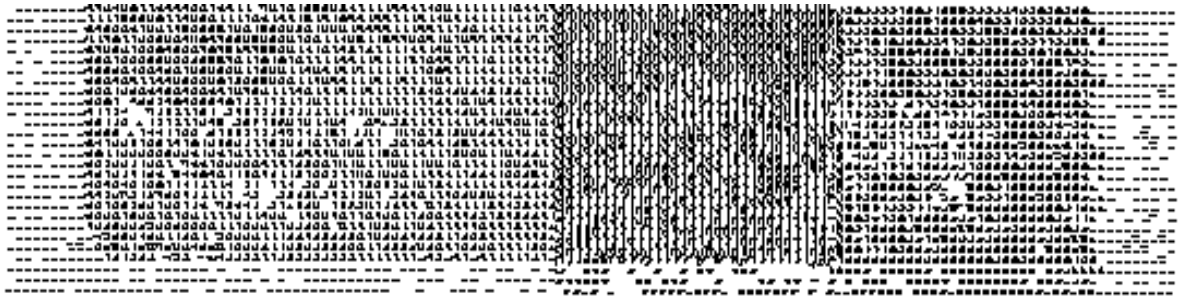


图 4 N=13 时一相 PWM 波形

图 5 N=11 时电机相电流波形

### 4 结束语

本文对基于规则采样的谐波消除 PWM 进行了仿真分析,找出了一种占用内存小、效率高的三相 PWM 实现法,并以功率 RMOS 为主电路元件,设计了具有转矩、磁通控制功能的逆变器。通过实际运行,表明此系统在较宽的频率调节范围内,响应快,噪音及脉动较小,尽管在稳定性上仍有些问题,我们相信经过不断改进,该逆变器在家用电器、交流伺服系统等较小功率的传动装置中具有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

1 Ellis R G. Harmonic analysis of industrial power system. IEEE Trans on IA, 1996, 32(2) : 417~421

2 Grotstollen H. Line voltage modulation; A new possibility of PWM for three phase inverters. IEEE Ann Meet Toronto, 1993:561 ~ 574

3 Patel H S, Hoft R G. Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters. Part I-Harmonic elimination. IEEE Trans Ind Applicat, 1973, IA-9(3) : 310 ~ 317

4 Enjeti P, Lindsay J F. Solving nonlinear equations of harmonic elimination PWM in power control. Electron lett, 1987, 23(12) : 656 ~ 657

5 Bowes S R. Regular-sampled PWM techniques minimize harmonics. PCIM, 1991, 17(5) : 15 ~ 32

6 Bowes S R, Clarle P K. Transputer based optimal PWM control of inverters. IEEE Trans Ind. Applicat, 1992, 28(1) : 72 ~ 80

## Design and Fabrication of RMOS Inverter Based on Regular-sampled Harmonic Elimination PWM

Zhuang Shengxiang    Li xuening    Li Zhaoji

(Inst. of Microelectronics UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** According to the principle of harmonic elimination of regular-sampled PWM, a simple and efficient algorithm which allows single-chip microprocessor implementation and generation of three-phase PWM is presented. Also a novel PWM inverter driven by RMOS is designed. Simulating and experimental results verifies the effect of the harmonic elimination.

**Key words** pulse width modulation; harmonic; inverter; rectangular groove gate MOS

编辑 徐安玉

.....

◦科研成果介绍◦

### 信号处理天线及其应用研究

主研人员: 邱文杰 杨超 方宙奇 康桂花 张玉梅

信号处理天线主要研究信号处理天线方面的三个内容:

- 1) 研究数字波束形成(DBF)技术在雷达中的应用及实现方案、算法和通道校正等关键技术, 给雷达的设计提供了重要的优点。
- 2) 自适应超分辨率向天线阵在电子对抗中的应用及实现方案, 天线单元和阵的设计以及各种影响因素的研究, 具有实用价值。
- 3) 研究自适应天线用于抑制雷达、通信系统中的强干扰和用在直播卫星电视接收系统中抑制弱干扰的实施方案、优化算法、信号处理结构、阵元和阵列设计以及对系统性能限制的因素。

该成果设计思想新颖, 理论分析正确, 结合工程设计应用证明, 方案合理, 算法先进, 考虑影响因素细致全面, 实际应用效果良好。

◦科 卞◦