

基于 8XC196MC 平均规则采样法 SPWM 的实现及其优化

Optimization Design for Medial Regularly Sampled SPWM Based On 8XC196MC

付胜杰 彭侠夫 厦门大学 361005

摘要：介绍了平均规则采样 SPWM 原理及其在 Intel 8XC196MC 为核心的控制系统中的实现。阐述了提升逆变器输出电压，优化电流波形的设计方法。实践证明，该方法性能良好且容易实现，值得推广。

关键词：平均规则采样；SPWM；谐波；优化

Abstract: The SPWM principle of Medial Regularly Sampling and the implementation of control system with Intel 8XC196MC as the kernel are introduced in this paper. And the method of improving the output voltage of inverter and optimizing the wave of current is expatiated. As proved by practice, this method should be generalized as it has good performance and is easy to be implemented.

Key words: Medial Regularly Sampled; SPWM; Harmonic; Optimization

引言

Intel 公司推出的 8XC196MC 系列电机控制专用芯片是专为电机高速控制所设计的 16 位微控制器。利用该系列芯片能方便的产生三相 SPWM 波形，以实现电动机的变频调速。本文将着重探讨平均规则采样法 SPWM 在 8XC196MC 上的实现及其控制逆变器输出波形优化的问题。

1, 80C196MC 微控制器概述

80C196MC 微控制器具有适合 PWM 逆变器、变频器及电机高速控制所需的许多特性。它由一个 C196 核心、一个三相波形发生器 WFG、一个多通道 AD 转换器及其他片内外设（如两个定时器、一个事件处理门阵列 EPA、两个通用 PWM 模块）等构成。

80C196MC 内置的波形发生器使之能高效、可靠地完成 PWM 的调制任务。WFG 具有三个同步的 PWM 模块，能产生三对同载波、同操作方式、等死区时间但脉冲宽度相互独立的 PWM 波形，能以载波频率重装载脉宽等数据，并向 CPU 申请中断。WFG 具有 4 种操作方式，与平均规则采样法 SPWM 对应的为中心对准方式 0。WFG 的功能配置及脉宽调制是通过设置其专用寄存器来完成的：控制寄存器 WG-CON 定义 WFG 的工作方式，并设置有死区时间；输出配置寄存器 WG-OUT 定义 WFG 各引脚的有效状态；WG-RELOAD 设置三角载波频率；相比较寄存器 WG-COMPx (x=1, 2, 3) 设置各脉冲宽度；保护寄存器 WG-PROTECT 配置 WFG 的保护功能。PWM 调制的实现就是在 WFG 的定时中断中设置 WG-COMPx 以产生合适的脉冲宽度。

2, 平均规则采样法原理及其在 80C196MC 中的实现

2.1 平均规则采样法原理

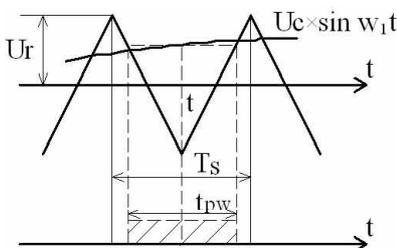


图 1 平均规则采样 SPWM

平均规则采样法 SPWM 原理如图 1 所示， T_s 为采样周期。由图可知，输出脉冲宽度 P_w 取决于在该脉冲的中心点时刻所采样到的调制波 $e=M \sin \omega t$ (M 调制深度, $M=U_c/U_r$) 的数值。采样时刻设定在三角载波的谷点处。以此时刻的正弦波的数值为中心，引一水平线与两侧三角载波相交。确定 SPWM 脉冲的前后沿，此时脉冲宽度 t_{pw} 计算式为式 1-1。与自然采样法相比，该方法求得的脉冲宽度略小；与对称规则采样法和不对称规则采样法相比，输出脉冲更接近于实际正弦调制波，而且每个采样周期只采样一次，微机处理时的工作量相对较少，易于在 8XC196MC 控制芯片中的实现。

$$t_{pw} = \frac{T_s}{2} (1 + M \sin \omega_1 t) \quad \text{式 1-1}$$

2.2 平均规则采样法在 80C196MC 中的实现

设定 80C196MC 波形发生器 WFG 工作于中心对准方式 0 模式，以 0.15° 为单位刻度建立单位正弦表存储于数据存储器。根据平均规则采样法原理可知，采样时刻 t 在三角载波谷谷处，设调制波周期内采样点个数为 k ，三角载波频率为 f_s ，调制波频率为 f_c ，则有：

$$t = k \times \frac{T_s}{2} = \frac{k}{2f_s} \quad \text{式 1-2}$$

$$\omega_1 = 2\pi f_c \quad \text{式 1-3}$$

将式 1-2、式 1-3 带入式 1-1 可得：

$$t_{pw} = \frac{T_s}{2} (1 + M \sin(k \frac{\pi}{N})) \quad \text{式 1-4}$$

N 为载波比 $N = \frac{f_s}{f_c}$; $k=1, 3 \dots (2N-1)$

由 80C196MC 工作于中心对准方式 0 模式，载波周期可由式 1-5 决定（其中 F_{xtal} 为 XTAL 引脚上的晶振频率，单位：MHz）；在忽略死区时间时，式 1-6 可求出由式 1-4 计算出所需导通时间的定时装载值：

$$T_s = \frac{4 * WG-RELOAD}{F_{xtal}} \quad (\text{us}) \quad \text{式 1-5}$$

$$t_{pw} = \frac{4 * WG-COMP}{F_{xtal}} \quad (\text{us}) \quad \text{式 1-6}$$

以上所讨论仅限于三相交流电中的一相，由于三相交流电存在 120° 的相位差，即采样点时间上相差 $2N/3$ ；因此可求得其余两相同一时刻所需加载值。

3, 逆变器输出波形优化

3.1 死区时间补偿

对于 PWM 型逆变器，在驱动功率管的开关信号中插入延时时间以防止直流母线直接短路，延时时间的引入将导致死区时间效应，引起逆变器输出波形的畸变和基波电压的降落，且随着载波频率的增大，这种影响愈为明显；影响了调速系统性能的进一步提高。

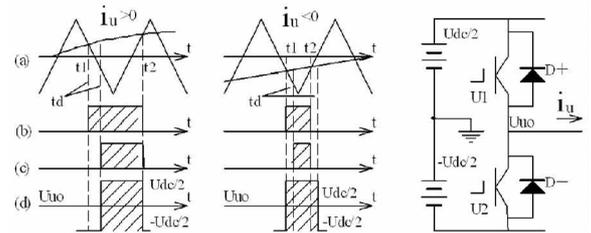


图 2 Td 对 SPWM 脉冲的影响

图 2 表示出在 SPWM 脉冲加入死区时间后对逆变器开关信号的影响，现对 U 相输出（设定电流流向负载为正）分析如下：

(1) 当 $i_u > 0$ 时， U_2 在 t_1 时刻关断， U_1 尚未开通，即 U_1 、 U_2 处于死区时间 T_d 内，为保持电流方向为正，续流二极管 D^- 开通， U_{uo} 被箝制在 $-U_{dc}/2$ ； t_1+T_d 时刻 U_1 导通， U_{uo} 电位变为 $U_{dc}/2$ ，直到 t_2 时刻 U_1 关断，二极管 D^- 续流， U_{uo} 电位又降为 $-U_{dc}/2$ ；由 (b) (d) 比较可知，逆变器输出比理想波形窄了 T_d 。

(2) 当 $i_u < 0$ 时， U_2 在 t_1 时刻关断， U_1 尚未开通，即 U_1 、 U_2 处于死区时间 T_d 内，为保持电流方向为负，续流二极管 D^+ 开通， U_{uo} 被箝制在 $U_{dc}/2$ ； t_1+T_d 时刻 U_1 导通， U_{uo} 电位保持为 $U_{dc}/2$ ；到 t_2 时刻 U_1 关断，二极管 D^+ 续流， U_{uo} 电位继续保持为 $U_{dc}/2$ ；直到 t_2+T_d 时刻 U_2 导通， U_{uo} 电位下落为 $-U_{dc}/2$ 由 (b) (d) 比较可知，逆变器输出比理想波形宽了 T_d 。

由 SPWM 调制原理可知，在调制波相角 $\omega t < 180^\circ$ ，即式 1-4 中 $(k/N) < \pi$ 时， $i_u > 0$ ；调制波相角 $\omega t > 180^\circ$ ，即式 1-4 中 $(k/N) > \pi$ 时， $i_u < 0$ 。

基于以上分析，同时考虑到 IGBT 开通 (T_{on})、关断时间 (T_{off}) 的影响，对 SPWM 波形作如下补偿：

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } i_u > 0 \text{ 时: } t_{pw1} &= t_{pw} + (T_d + T_{on} - T_{off}) \\ \text{当 } i_u < 0 \text{ 时: } t_{pw1} &= t_{pw} - (T_d + T_{on} - T_{off}) \end{aligned} \right\} \quad \text{式 1-7}$$

(下转第 76 页)

```

HDC hdc;

switch( msg )
{
    case WM_PAINT:
        hdc = BeginPaint( hWnd, &ps );

        DrawData(hWnd,hDC,datax,
        datay,minx,maxx,miny,maxy,datanum);
        EndPaint( hWnd, &ps );
        break;
    case WM_COMMAND:
        switch( wParam )
        {
            break;
        }
        break;
    case WM_DESTROY:
        PostQuitMessage(0);
        break;
    default:
        return( DefWindowProc(
        hWnd, msg, wParam, lParam ));
}
return 0;
}
// 绘制二维曲线
    
```

4, 总结

本文提出的通过 mex 文件实现 VC 和 Matlab 混合编程的方法可以实现 VC 与 Matlab 的无缝链接。通过本文提出的方法可以利用几乎所有 Windows 系统和其他第三方提供的 SDK 函数, 这样开发人员可以将 Matlab 开发环境的强大计算功能和 Windows SDK 可实现的其他各种功能结合起来。本文提出的方法也是 Mathworks 公司扩展 Matlab 的主要手段。本文最后用一个实际的案例证明, 本文提出的方法是完全可行的。

参考文献

- 1、刘志俭, 潘献飞, 连军想. Matlab 外部程序接口(6.X)[M]. 北京: 科学出版社. 2002.
- 2、郭虹, 薄云飞, 林冬. VC++ 与 Matlab 混合编程技术研究[J]. 计算机工程. 2002. 9: 269-271.
- 3、林岚, 周云波, 杨玉星等. Matcom: Matlab 与 C++ 结合的有效途径[J]. 微机处理. 1999, 5(2): 50-51.
- 4、闻斌, 崔键昆. MATLAB 与 Visual C++ 的联合应用[J]. 计算机与现代化. 2004. 2: 14-16.

作者简介:

廖瑞华, 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为算法与应用软件。

(上接第 67 页)

将式 1-7 修正后的 IGBT 导通时间带入式 1-6, 即可求得补偿后的寄存器值 W G - C O M P。

基于本文给出的补偿方法, 对一台异步电动机驱动系统进行试验验证, 主要参数为: 直流电压 $U_d=540V$, $T_d=5\mu s$; 异步电动机: $P_N=3kw$, $I_N=6.4A$, $T_N=2.2Nm$, $n_N=2880r/min$; 逆变器开关频率 $9.6KHz$ 。

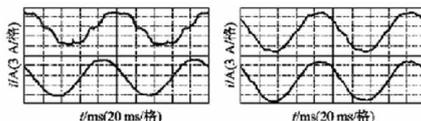


图 3 死区补偿前后电流波形比较

3.2 准最优 SPWM 的实现

由于 SPWM 算法的限制, 逆变器输出基波幅值为 $\sqrt{3}MU_{dc}/2$ (文献【1】), 使得直流电压不能充分利用, 情况严重时将导致电机电流上升, 温度上升加快, 直接威胁到电机的安全运行。为消除这种不良影响, 提升逆变器输出电压, 提出准最优 SPWM, 即在逆变器输出叠加 3 次谐波, 叠加后调制波如图 4 所示, 则式 1-4 变为式 1-8 的形式:

$$tpw = \frac{T_s}{2} \left\{ 1 + M \left[\sin(k \frac{\pi}{N}) + \frac{1}{6} \sin(3k \frac{\pi}{N}) \right] \right\} \quad \text{式 1-8}$$

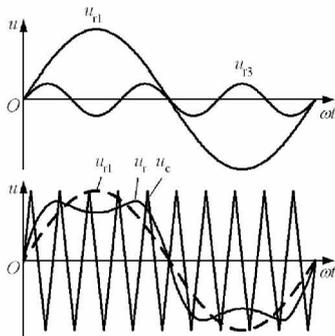


图 4 叠加三次谐波的调制波

试验证明: 与不叠加 3 次谐波相比, 叠加三次谐波后, 允许调制波中基波幅值增至一倍, 因而线电压的基波幅值可提高 $(2/\sqrt{3} - 1) = 15\%$ 。在三相 380V 输入, $U_d = 540V$ 的情况下, 输出线电压的有效值可以达到 380V。

4、结语

本文通过对 SPWM 在 80C196MC 实现的分析, 可以得出:

- (1) 死区的加入造成逆变器输出波形的畸变, 通过死区补偿可以得到理想的正弦波输出;
- (2) 由于 SPWM 调制方法本身的限制, 使得逆变器输出线电压基波幅值偏低, 通过谐波注入, 可以将三相输出电压提升到正常水平。

参考文献:

- 【1】 陈国呈等.《新型电力电子变换技术》. 中国电力出版社
- 【2】 吴守箴等.《电气传动的脉宽调制控制技术》. 机械工业出版社
- 【3】 黄俊等.《电力电子变流技术》. 机械工业出版社
- 【4】 R.C.Dodson, P.D.Euans, H.Taba-tabaei

- Yazdi and S.C.Harley. Compensation for dead time degradation of PWM inverter wave-forms[J]. IEEE Proc., vol. 137, Pt. B, No. 2, March 1990, pp. 73-81
- 【5】 Alfred R. Munoz and Thomas A. Lipo. On-Line Dead-time Compensation Technique for Open Loop PWM-VSI Drives[J]. IEEE TRANS. Power Electron, vol. 14, No. 4, JULY 1999, pp. 683-689
- 【6】 Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul. Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation[J]. IEEE TRANS. Power Electron, vol. 11. No. 2, MARCH 1996, pp. 221-227

(上接第 74 页)

参考文献:

- 1、张信东.《信息系统开发教程》. 清华大学出版社. 2003 年 3 月第一版
- 2、Robert W. Sebesta.《Web 编程技术》. 机械工业出版社出版. 2003 年 4 月第 1 版
- 3、李瑞旭.《ASP 实例教程》. 中国电力出版社. 2000 年 8 月第一版
- 4、王兴东.《ASP 应用编程 150 例》. 电子工业出版社
- 5、龙马工作室.《ASP+SQL Server 组建动态网站 实例精讲》. 人民邮电出版社
- 6、丁贵广.《ASP 编程基础与实例》. 机械工业出版社. 2003 年 4 月第一版
- 7、张登辉.《ASP 编程基础及应用》. 机械工业出版社出版. 2002 年 9 月
- 8、Derek Ferguson.《ASP 程序调试实用手册》. 电子工业出版社. 2002 年 2 月第二版
- 9、宣小平, 但正刚, 张文毅.《ASP 数据库系统开发实例导航》. 人民邮电出版社出版. 2003 年 1 月
- 10、电子教程.《Dreamweaver 4 教程》
- 11、电子书籍.《ASP 中文手册》

(上接第 83 页)

参考文献

- 【1】 David Taubman. "High Performance Scalable Image Compression with EBCOT". IEEE Transactions on Image Processing. Vol. 9 No. 7, pp. 1158-1170, July 2000.
- 【2】 Robert M. Gray David L. Neuhoff. "Quantization", IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 44 No. 6. October 1998.
- 【3】 A. Said W. Pearlman. "A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees". IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. Vol. 6 pp. 243-250 June 1996.
- 【4】 贾志科, 崔慧娟, 唐昆. "改进的 SPIHT 图像压缩编码方法". 清华大学学报(自然科学版). 2001

作者简介:

张宝文, 男, 副教授, 绥化学院教师, 主要从事计算数学研究和教学工作。