

# 电梯门机伺服系统谐波抑制策略仿真分析

任 彧, 莫雪娟

(杭州电子科技大学 计算机学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 电梯门机伺服控制系统的谐波不仅使电机产生机械振动,缩短了电机使用寿命,而且影响系统的正常工作。为了解决电梯门机伺服控制系统中存在的谐波问题,提出了一种采用可变频率载波的正弦脉宽调制(SPWM)方法来抑制谐波的策略,从三相静止坐标系下永磁同步电机(PMSM)的数学模型出发,对电梯门机谐波产生的原因进行了分析,并在Matlab仿真平台上进行了实验验证。实验结果表明,该方法抑制了电梯门机谐波,使电机定子电流波形趋于平滑,提高了电机的稳定性。

**关键词:** 电梯门机;永磁同步电机;谐波抑制;正弦脉宽调制

中图分类号: TM301.2;TH39 文献标志码:A

文章编号: 1001-4551(2012)05-0536-05

## Simulation and analysis of harmonic suppression strategy in elevator door-machine servo system

REN Yu, MO Xue-juan

(College of Computer, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The harmonics will make the elevator-door motor generate additional vibration, reduce its use-time, affect the normal operation of system. In order to solve the existence of harmonic problems in the elevator door-machine servo-control system, a harmonic suppression strategy based on the variable frequency carrier wave of sinusoidal pulse width modulation (SPWM) was proposed. The mathematical model of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) in the three-phase static coordinate system was introduced and the reasons of the harmonic in the elevator-door motor were analyzed. Experiments were carried out based on the Matlab platform. The experimental results show that the proposed method makes the motor stator current waveform tend to be smooth, and the motor's stability could also be enhanced.

**Key words:** elevator door-machine; permanent magnet synchronous motor (PMSM); harmonic suppression; sinusoidal pulse width modulation (SPWM)

## 0 引 言

近年来,随着变频器、开关电源、伺服控制系统等大量应用,工业设备的谐波污染<sup>[1]</sup>日趋严重。在电气设备中,谐波电流<sup>[2]</sup>占基波电流的比重虽然不大,但设备的有效电阻会因高频趋肤效应<sup>[3]</sup>而增大,从而导致附加损耗变大,设备发热量增加,效率降低,最终使电机的稳定转矩减小,产生波动转矩<sup>[4]</sup>,增大了电机噪声。此外,谐波电流使得设备使用寿命大大缩短,同时干扰设备通信,造成系统稳定性大大降低。

基于谐波的抑制一般有以下几种方案:①LC滤波<sup>[5]</sup>,通过不同的载波调制波之间的比例以及频率范

围来计算并得到LC滤波器参数,从而滤除部分谐波;②无源滤波与有源滤波相结合<sup>[6]</sup>,通过几组LC并联,有针对性地滤除部分谐波,从而达到一定的无功补偿效果,再通过有源滤波器进一步滤除谐波;③智能滤波<sup>[7]</sup>,通过模糊神经网络控制滤波参数,抑制谐波,以提高滤波效率。在各种谐波抑制的方法上,普遍存在着一些问题,如设计复杂、成本高等。

本研究针对电梯门机伺服控制系统的特点以及其使用器件的极限性,通过分析电机谐波产生的原因,提出一种新型、简单、有效的谐波抑制策略,去除谐波尖峰,使谐波峰值的幅度相对平滑,从而降低谐波对设备的干扰,提高系统的稳定性,并通过Matlab仿真对该方

法的有效性进行验证。

### 1 三相永磁同步电机数学模型

电梯门机伺服系统是采用三相正弦波驱动的永磁同步电机,故本研究介绍了永磁同步电机在A、B、C三相静止坐标系下的数学模型。通常,永磁同步电机的定子上有A、B、C三相对称绕组,转子上装有永久磁钢,定子和转子间通过气隙磁场耦合。由于电机定子与转子之间的相对运动,以及永磁磁极与定子绕组、定子绕组与绕组之间的相互影响,导致PMSM内部的电磁关系<sup>[8]</sup>十分复杂。为简化分析,本研究作如下假设:

- (1) 忽略饱和、涡流、磁滞效应的影响;
- (2) 电机的电流为对称的三相正弦波电流,各绕组轴线在空间上互差120°电角度;
- (3) 永磁体磁动势恒定,即等效的励磁电流恒定不变;
- (4) 三相定子绕组在空间呈对称星型分布,定子各绕组的电枢电阻、电枢电感相等。

则电机的数学模型为:

(1) 磁链方程。定子每相绕组的磁链不仅与三相绕组电流有关,而且与转子永磁极的励磁磁场和转子位置有关,所以磁链方程<sup>[9]</sup>为:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA}(\theta) & M_{AB}(\theta) & M_{AC}(\theta) \\ M_{BA}(\theta) & L_{BB}(\theta) & M_{BC}(\theta) \\ M_{CA}(\theta) & M_{CB}(\theta) & L_{CC}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{fA} \\ \psi_{fB} \\ \psi_{fC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\theta = \omega_r t$ ,  $\omega_r$ —转子的角速度;  $L_{xx}(x=A, B, C)$ —绕组自感;  $M_{xy}(x, y=A, B, C; x \neq y)$ —各相绕组间的互感;  $\psi_{fA}, \psi_{fB}, \psi_{fC}$ —转子磁链在A、B、C三相上的交链。

并且:

$$\begin{bmatrix} \psi_{fA} \\ \psi_{fB} \\ \psi_{fC} \end{bmatrix} = \psi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\psi_f$ —定子电枢绕组最大可能匝链的转子每极永磁磁链。

(2) 定子电压平衡方程。永磁同步电机的定子磁链是由定子三相绕组电流和转子永磁极产生的,定子三相绕组电流产生的磁链与转子位置角有关,转子永磁极产生的磁链也与转子位置角有关。因此得到定子电压平衡方程<sup>[10-11]</sup>为:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $U_A, U_B, U_C$ —三相绕组相电压;  $R$ —每相绕组电阻;  $I_A, I_B, I_C$ —三相绕组相电流;  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$ —

三相绕组匝链的磁链。

将式(1,2)代入式(3)得到永磁同步电机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{AA}(\theta) & M_{AB}(\theta) & M_{AC}(\theta) \\ M_{BA}(\theta) & L_{BB}(\theta) & M_{BC}(\theta) \\ M_{CA}(\theta) & M_{CB}(\theta) & L_{CC}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_f \cos \theta \\ \psi_f \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \psi_f \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

因为三相绕组为星型链接,则有  $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_S$ ,  $M_{AB} = M_{BA} = M_{AC} = M_{CA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{SS}$ ,  $I_A + I_B + I_C = 0$ ,代入式(4),得到定子电压方程为:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} R_S + L & 0 & 0 \\ 0 & R_S + L & 0 \\ 0 & 0 & R_S + L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_f \cos \theta \\ \psi_f \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \psi_f \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:  $L = L_S - M_{SS}$ 。

由式(5)得到:  $L, R_S, \psi_f$  为电机自身所固有的参量,不会因外在条件影响而改变,故电压值是由电流值决定的;反之,定子电流的成分在很大程度上由给定的三相电压决定。

## 2 谐波产生的原因及其抑制策略

### 2.1 电梯门机系统谐波产生的原因

从上述的永磁同步电机在三相静止坐标系下的数学模型分析可知:谐波电流的大小主要取决于三相电压的干净程度,即存在谐波电压的程度;其次才是取决于所使用电机固件的性能,与生产技术精度相关。对于整个电梯门机伺服控制系统的设计是通过SPWM方法得到6路脉冲来控制智能功率模块(IPM)内部6个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的导通与关断,从而驱动电梯门电机运转。

根据三相电压的特性可知,各相电压的产生完全相同,不同的只是相位角度的偏移,因此本研究仅针对单相电压谐波产生原因进行分析。为了简化分析,可假设:

- (1) 输入电压为理想电压源,没有纹波;
- (2) 功率开关元件为理想器件,具有理想开关特性。

如图1(a)所示,本研究给定理想电压源  $E$ ,4个功率开关器件  $T_1, T_3, T_4, T_6$ ,用调制波与载波得到的SPWM波形来控制开关器件的导通与关断,最终得到A相电压。A相电压  $U_{A0}$  波形如图1(b)所示。

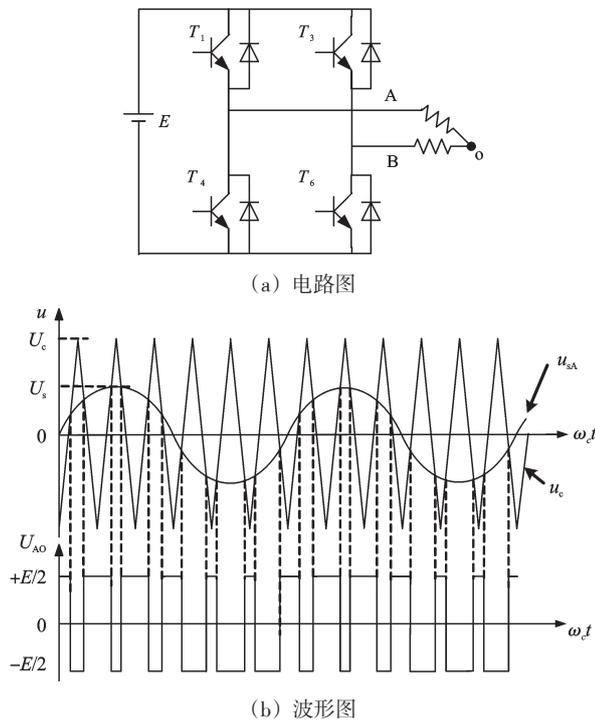


图1 用SPWM方法生成三相电压

正弦波  $u_{sA}$  为 A 相调制波, 三角波  $u_c$  为载波, 用三角波与正弦波比较, 当正弦波大于三角波时, 开关器件  $T_1$ 、 $T_6$  导通, 产生 A 相正电压  $+E/2$ ; 当正弦波小于三角波时, 开关器件  $T_3$ 、 $T_4$  导通, 产生 A 相负电压  $-E/2$ 。

为了便于分析, 本研究将三角波采用分段线性函数来表示:

$$u_c(\omega_c t) = \begin{cases} -(\omega_c t - 2\pi k - \pi) \frac{2U_c}{\pi} + U_c, & 2\pi k + \pi \leq \omega_c t \leq 2\pi k + 2\pi \\ (\omega_c t - 2\pi k) \frac{2U_c}{\pi} - U_c, & 2\pi k \leq \omega_c t \leq 2\pi k + \pi \end{cases} \quad (6)$$

$k=0, 1, 2, \dots$

正弦调制波为:

$$u_s(\omega_s t) = U_s \sin(\omega_s t - \theta) \quad (7)$$

由于 SPWM 波的采样点为正弦波与三角波的交点, 即当  $u_s = u_c$  时进行采样, 令调制比  $M = u_s / u_c \leq 1$ , 则根据式(6)和式(7)可得到 SPWM 波的时间函数  $u_L$  为:

$$u_L = \begin{cases} \frac{E}{2}, & 2\pi(k+1) - \frac{\pi}{2}(1+M \sin Y) \leq X < 2\pi k + \frac{\pi}{2}(1+M \sin Y) \\ -\frac{E}{2}, & 2\pi k + \frac{\pi}{2}(1+M \sin Y) \leq X < 2\pi(k+1) - \frac{\pi}{2}(1+M \sin Y) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $Y = \omega_s t - \theta$ ,  $X = \omega_c t$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$

为了便于谐波分析, 本研究将  $u_L$  展开为双重傅里

叶级数表达式, 可得到 A 相电压如下:

$$u_{AO} = \frac{ME}{2} \sin(\omega_s t - \theta) + \frac{2E}{\pi} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} J_0\left(\frac{mM\pi}{2}\right) \sin\frac{m\pi}{2} \cos(mN\omega_s t) + \frac{2E}{\pi} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 2, \pm 4, \dots}^{\pm \infty} \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} \sin\left(\frac{m+n}{2}\pi\right) \cos\frac{n\pi}{2} \cos[(mN+n)\omega_s t - n\theta] + \frac{2E}{\pi} \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots}^{\pm \infty} \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} \sin\left(\frac{m+n}{2}\pi\right) \sin\frac{n\pi}{2} \sin[(mN+n)\omega_s t - n\theta] \quad (9)$$

式中:  $N$ —载波比,  $N = \omega_c / \omega_s \gg 1$ ;  $m$ —相对于载波的谐波次数;  $n$ —相对于调制波的谐波次数。

从式(9)可以看出, A 相输出电压包含以下几个部分, 即: 基波、载波、载波的  $m$  次谐波、载波及载波  $m$  次谐波的上下边频谐波。当  $m$  为偶数时, 不存在载波的  $m$  次谐波; 当  $m+n$  为偶数时, 载波及载波  $m$  次谐波的上下边频谐波也不存在。取调制比  $M=0.8$ , 通过式(9)可得到 A 相电压频谱分布, 如图2所示。从图2中可知: 当  $m=0, n=1$  时, 频率为基波频率, 且为输出电压所需要的部分; 当  $m=1, n=0$ , 即角频率为  $\omega_c$  时, 谐波电压的幅值比基波幅值大, 对整个系统的干扰最强。

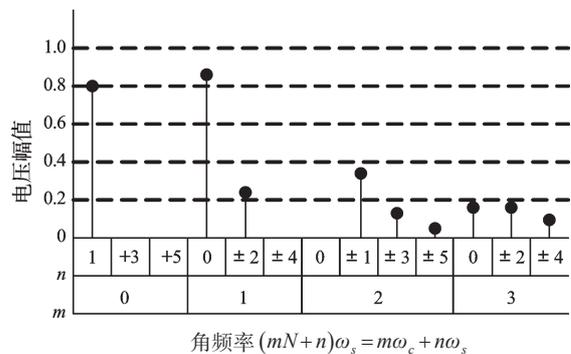


图2  $M=0.8$  时 A 相输出电压频谱

由式(9)和图2分析可得: 谐波的频率与幅值不仅与  $M$  有关, 也与载波比  $N$  有关。谐波的频率主要取决于  $N$  的值,  $N$  越大, 谐波频率越高, 滤波越容易。当谐波的频率达到一定值时, 通过简单的电容就可以达到很好的滤波效果。输出电压谐波主要集中在载波频率的  $m$  次附近, 并且谐波的幅值很大; 基于基波的  $n$  次谐波幅值相对小很多。对于整个系统而言, 影响较大的还是基于载波的  $m$  次谐波。在电梯门机伺服系统中, 使用的功率开关元件的频率范围为  $5 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$ , 在设计时选取的载波频率  $\omega_c$  一般比较大, 故谐波都是频

率很高的高次谐波,形成很强的干扰。

## 2.2 基于可变频率载波的谐波抑制策略

针对上述这种常规的SPWM方法分析可知:载波频谱和输出谐波频谱都是离散的,其能量主要集中在载波频率和载波的 $m$ 次谐波频率附近,谐波的幅值很大,对系统造成了严重影响。若能使载波频率在适当的频率范围内变化,那么谐波将分配到不同的频率段,相比于固定载波频率,其分布范围更广,谐波幅值在各频率段上的分配也将趋于均匀,从而降低谐波对系统的干扰。

因此,基于可变频率载波的谐波抑制策略可以有以下两种方案:

(1) 随机变化的载波频率:载波频率的变化是不规则的,具有随机性;

(2) 规则可控的载波频率:载波频率按一定的规则交替变化。

这两种方案中,载波频率不断变化,都能使谐波的频谱范围扩大,谐波峰值幅度大幅降低,相比于采用固定载波频率的SPWM方法具有更低的电磁干扰和更好的输出性能。方案(1)采用随机变化的载波,在某个时刻载波频率是一个随机值,存在不确定性而且分析困难,进一步的谐波抑制将难以实现。方案(2)采用规则可控的载波频率,可以大大提高谐波的可控性,为后续的波形分析处理带来方便,但成本较高。采用哪种方案可以根据具体情况来决定。本研究采用方案(2)来说明可变载波频率在电梯门机谐波抑制上的有效性。

针对电梯门机的特性,本研究采用正弦信号来控制载波频率,使载波频率随着一个固定的正弦信号发

生交替变化。在Matlab仿真中,本研究取 $f_c = f_0 + \Delta f \times \sin(7\,000t)$ ,其中, $f_0 = 2\,000\text{ Hz}$ , $\Delta f = 500\text{ Hz}$ , $\sin(7\,000t)$ 是载波频率的变化规律,仿真模型如图3所示,其中S函数的功能是输入频率函数 $f_c$ ,输出为在该频率函数下的等腰三角波,以此作为产生SPWM的载波源。

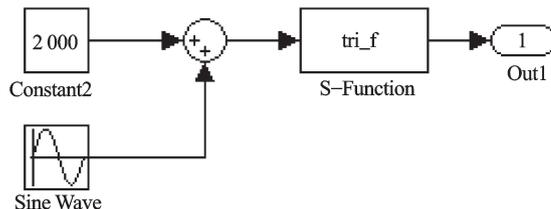


图3 可变频率载波的仿真模型

## 3 谐波抑制策略仿真

### 3.1 电机控制系统模型建立

在Matlab7.0的Simulink环境下,本研究利用SimPowerSystem Toolbox丰富的模块库,建立了电机控制系统的仿真模型,如图4所示。该仿真给定的调制波为正弦函数 $u_1(t) = \sin(25t)$ , $f_s = 25\text{ Hz}$ ,载波为等腰三角波 $u_2(t)$ , $f_c = 8\,000\text{ Hz}$ (该载波为固定频率的载波,当使用可变频率载波时,把载波模块替换为图3所示的模型)。在该模型中,三角波由Repeating Sequence模块得到,正弦信号由Sine Wave模块得到,通过Relational Operator模块实现,即:当正弦信号的值大于三角波的值时,输出1;否则输出-1。从而得到6路信号来控制后端逆变器内部IGBT的导通与关断,同时逆变器模块接300V直流电压,通过得到A、B、C三相电压来控制电机的运转,笔者用电机测试信号分配器来观

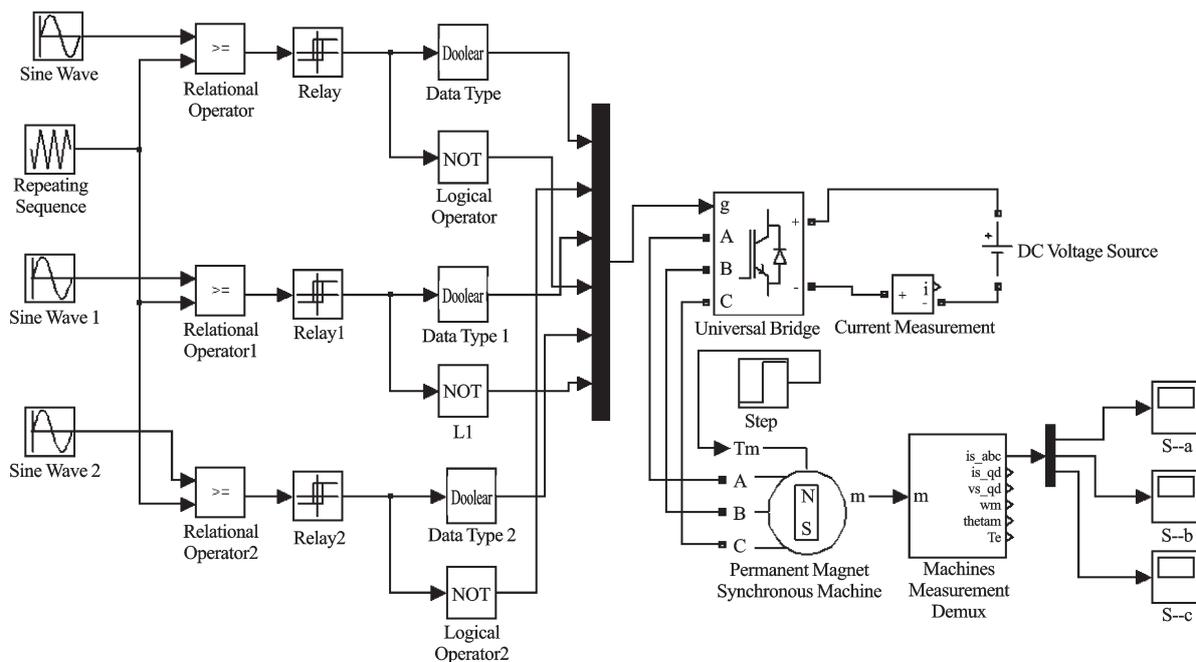
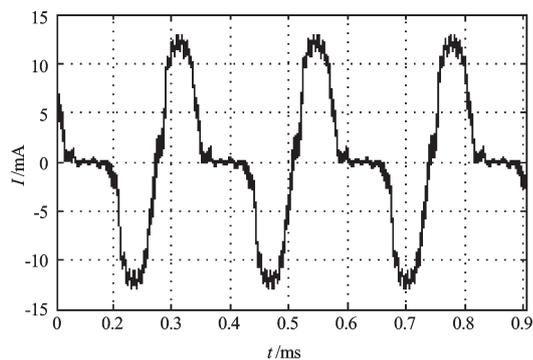


图4 电机运转系统的Simulink模型

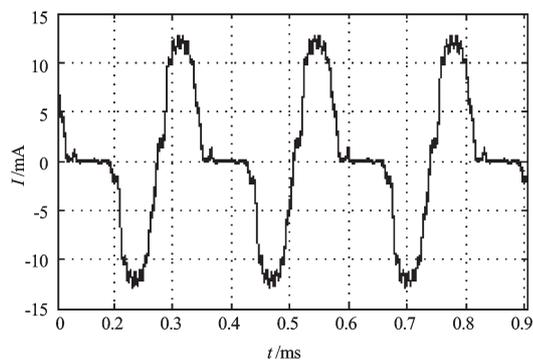
察得到的A、B、C三相定子电流。

### 3.2 仿真结果分析

本研究依据实际的电梯门机伺服控制系统设置各部分的参数,电机为永磁同步伺服电机,在器件理想的状态(开关器件为理想器件)下测得的仿真波形如图5所示。



(a) 固定频率载波



(b) 可变频率载波

图5 A相定子电流波形图

A相定子电流在固定载波频率和正弦可变载波频率下电流的波形图如图5所示,B相、C相电流波形图相似,不在本研究中给出。图5(a)中,电流波形具有很多毛刺,而且在零点附近及峰值处波形较粗,说明携带有高频谐波。图5(b)中,载波频率按正弦规则交替变化处理后,其波形的毛刺明显减少,在零点处波形趋于平滑。

从仿真结果可知,可变频率载波的SPWM方法在对谐波抑制上取得了较好的效果,由原先很多毛刺的波形变为较平滑的波形,对于波形的波峰处仍具次高频谐波的情况需要通过进一步谐波抑制来削弱。在总能量上,本研究采用正弦可变频率载波的SPWM方法抑制了高频谐波,减少了电机的波动转矩,更多的能量用于电机的稳定转矩,因此,提高了能源的利用率。

## 4 结束语

针对电梯门电机定子电流谐波产生的原因,本研

究提出了一种基于正弦可变频率载波的谐波抑制策略。该方法使得电机转动的定子电流毛刺减少,电流波形趋于平滑,在一定程度上抑制了谐波,防止整个系统受到电压幅值过高的谐波干扰,保证了系统的稳定性。通过仿真证实了该方法的有效性,从仿真结果可知,该方法不能完全地抑制谐波,只是对电压幅值过高的谐波进行了抑制,需通过进一步研究来找到完全抑制的方法,这与电机本身的参数及性能有很大的关系。下一步可以在该抑制策略的基础上进行深入研究,得到完全谐波抑制的方法,比如用数字FIR滤波器等等,以增强电梯门系统运行时的稳定性。

### 参考文献(References):

- [1] GUO Ying-na, CHENG Wei-bin, KANG Si-min, et al. Analysis and Design of Harmonic Suppression Circuit with Quasi-square Wave Compensation [C]//Power Electronics and Motion Conference. Wuhan: [s.n.], 2009: 1689-1670.
- [2] LASCU C, ASIMINOAEI L. Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(2): 337-339.
- [3] AMORE M D, SARTO M S, ALOIA A G D. Skin-Effect Modeling of Carbon Nanotube Bundles: The High-Frequency Effective Impedance [C]// Electromagnetic Compatibility (EMC), 2010 IEEE International Symposium on, Fort Lauderdale, FL: [s.n.], 2010: 847-849.
- [4] 杨克立. 一种永磁同步电机容错控制方法的研究[D]. 郑州: 郑州大学电气工程学院, 2009: 8-20.
- [5] 谭丽平, 李晓松, 罗振宇. 基于MATLAB仿真的SPWM逆变电路谐波分析及滤波器设计[J]. 长沙理工大学学报, 2010, 7(3): 42-46.
- [6] 牟龙华, 张大伟, 周伟. 新型LC并联谐振型混合有源滤波器设计[J]. 电力系统及自动化学报, 2010, 22(3): 55-57.
- [7] WANG Wen-xing, ZHU Xue-ling. Harmonic-Suppression System based on Fuzzy Neural Control in Power Line [C] // Information Engineering (ICIE), 2010 WASE International Conference on. Beidaihe, Hebei: [s.n.], 2010: 93-96.
- [8] 许振伟. 永磁交流伺服系统及其控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2003.
- [9] 陈荣. 永磁同步电机控制系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 刘益标, 陈钧. 基于DSP的电梯永磁同步电机的DTC控制系统[J]. 机电工程技术, 2011, 40(11): 28-31.
- [11] 陈涛. 永磁同步电动机交流伺服系统研究[D]. 北京: 北方工业大学机电工程学院, 2009.

[编辑: 张翔]