

# 混沌 SPWM 原理及其谐波抑制特性分析\*

陆益民<sup>1</sup> 张 波<sup>2</sup> 毛宗源<sup>3</sup>

(1. 广西大学电气工程学院 南宁 530004; 2. 华南理工大学电力学院 广州 510640;

3. 华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510640)

摘要: 常规正弦脉宽调制(Sinusoidal pulse width modulation, SPWM)的输出波形在载波频率及倍频周围含有较高谐波成分, 基于混沌理论提出了一种新型脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)原理——混沌正弦脉宽调制(Chaos-based sinusoidal pulse width modulation, CSPWM), 其三角载波信号的频率按一维混沌映射帐篷函数规律变化, 从而改变谐波的频谱分布, 使谐波连续均匀分布在较宽的频带范围内, 抑制了由谐波引起的电磁噪声。将 CSPWM 应用于电压型逆变器, 结果表明, 其有很好的谐波抑制特性, 且用单片机实现简单。

关键词: PWM 混沌 谐波

中图分类号: TM301.2

## 0 前言

电动机是厂矿企业各种机械设备广泛使用的一类动力源, 同时也是主要的噪声源。现代环境保护法规对各种噪声指标作了严格限制, 噪声已成为电动机的主要技术指标之一, 更成为考核其产品市场竞争力的重要因素<sup>[1]</sup>。电磁噪声是电动机噪声的重要组成部分, 电磁噪声主要是定子产生振动而辐射的噪声, 在很多场合, 它们甚至会引起与之相连的机械部件的共振。用逆变器供电的电动机, 由于电源谐波的影响, 电动机的噪声有所增加, 一般增加 5~6 dB, 严重的可增加 10 dB, 因此除电动机设计应合理外, 逆变器的设计也至关重要<sup>[2]</sup>。

常规正弦脉宽调制(Sinusoidal pulse width modulation, SPWM)逆变器的输出信号中含有较高谐波成分, 是产生电磁噪声的主要根源。谐波的分布与载波频率  $f_c$  有关, 在常规 SPWM 中,  $f_c$  是固定的, 则其频谱也是固定的, 幅值较大的谐波主要发生在  $f_c$  及其倍频附近, 因而给滤波设计带来困难。

如果  $f_c$  在一定的范围内按非周期的规律变化, 则可以改变谐波的频谱分布, 使谐波连续分布在较宽的频率范围内, 这样尽管总的谐波能量不变, 但谐波峰值减小, 从而达到抑制电磁噪声和机械共振的目的。随机脉宽调制(Random pulse width modulation, RPWM)技术即在此思想基础上逐步发展起来, 按随机信号在调制过程中作用的原理不同,

RPWM 主要有三种方式<sup>[3]</sup>: 位置随机 RPWM、频率随机 RPWM 和随机开关 RPWM。每一种方式均离不开随机信号的产生, 由于理想的随机信号较难获取, 往往用伪随机信号来代替<sup>[4]</sup>, 因而其规律性较难把握, 实际中也较难实现。

混沌是一种由确定性系统产生的貌似随机的信号, 它可以通过确定性方程描述和实现, 这使其既具有随机信号的特点, 又易于实现和控制, 在通信、电力电子等领域的信号调制过程中受到越来越多的关注<sup>[5-8]</sup>, 为此在混沌理论的基础上提出了一种新的脉宽调制原理——混沌正弦脉宽调制(Chaos-based sinusoidal pulse width modulation, CSPWM), 并探讨和分析其工作特性。

## 1 常规 SPWM 及随机 SPWM 原理

常规 SPWM 的脉冲宽度由三角载波和正弦调制波的瞬时交点确定。若假设 SPWM 中, 三角波的幅值为 1, 周期为  $T_c$ , 正弦波的幅值为  $A$ , 角频率为  $\omega$ , 则正弦调制波和三角载波的方程式分别为式(1)和式(2)。

$$u_r = A \sin \omega t \quad (1)$$

$$u_t = k_i t + b_i \quad (2)$$

式中  $k_i = 4(-1)^{i-1} / T_c$   
 $b_i = (-1)^i 2(i-1) \quad (i=2, 3, 4, \dots)$

这里  $A$  为正弦波和三角波的幅值之比, 称为调制度, 而三角波与正弦波的频率之比  $N = f_c / f_r$  称为载波比。由于两个波形的交点需由超越方程解出, 要实时求解比较困难, 因此在微机实时控制中常采用规则采

\* 国家自然科学基金(60474066, 50177009)、广东省自然科学基金重点项目(05103540)和广西大学科研基金(DD020008)资助项目。20050109 收到初稿, 20050907 收到修改稿

样法近似地确定脉冲的生成时刻。常规 SPWM 的调制波、载波及 PWM 输出波形见图1。

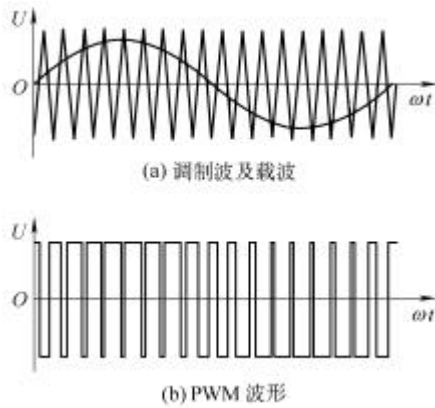


图1 常规 SPWM 波形

在位置随机 SPWM、频率随机 SPWM 和随机开关 SPWM 三类随机 SPWM 中,以频率随机 SPWM 最为常见,其基本原理是通过随机改变载波的频率,来改变 PWM 的频谱。由于 PWM 的频谱与载波频率直接相关,其最大谐波出现在载波频率处,载波频率高,谐波向高频方向移动。载波频率低,谐波向低频方向移动,这样随着载波频率的随机变化,谐波也随机分布在一个广泛的区域,从而降低了固定频率的噪声。改变频率的方法一般有两种:一是每个载波周期都随机地改变载波频率,这样载波比为  $N$  时一个调制周期就需要  $N$  个随机数;二是以  $60^\circ$  电角度为一个单位,随机地改变这  $60^\circ$  电角度的载波数,这样一个周期只需要 6 个随机数。频率随机 PWM 有多种实现方法,在参考文献[9]中,每个载波周期的变化量由带宽受限制的白噪声或周期噪声产生。

## 2 混沌 SPWM 原理、实现及谐波抑制特性分析

CSPWM 仍采用三角波调制,但在每个载波周期,三角载波信号的周期  $T'_i$  按一定的规律变化

$$T'_i = \frac{x_n}{M(x)} T_i \quad (3)$$

式中,  $T_i$  为一恒定的周期值,  $x_n$  是混沌序列  $x$  的第  $n$  个元素,  $M(x)$  为混沌序列在  $n$  足够大时的均值。为简单起见,混沌信号由一维映射帐篷函数生成。帐篷函数定义如下

$$x \rightarrow f(x) = \begin{cases} 2mx & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 2m(1-x) & 0.5 < x \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

如果参数  $0 < \mu < 1$ , 则  $f(x)$  是  $(0, 1) \rightarrow (0, 1)$  的映射, Lyapunov 指数由下式计算

$$l = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(2m) = \ln(2m) \quad (5)$$

当  $0 < \mu < 0.5$  时,  $l < 0$ ,  $x=0$  是此离散动力学系统唯一的稳定不动点。当  $0.5 < \mu < 1$  时,  $l > 0$ , 正的 Lyapunov 指数意味着系统是混沌的<sup>[10]</sup>, 对初值敏感依赖, 在状态空间上具有遍历性。因而帐篷映射虽然由确定性的非线性差分方程描述, 不包含任何随机因素, 但其轨迹却具有类似随机的行为。图 2 为帐篷函数的 Lyapunov 指数随  $\mu$  的变化曲线, 图 3 为分岔图, 描绘了其由周期解通向混沌的道路。

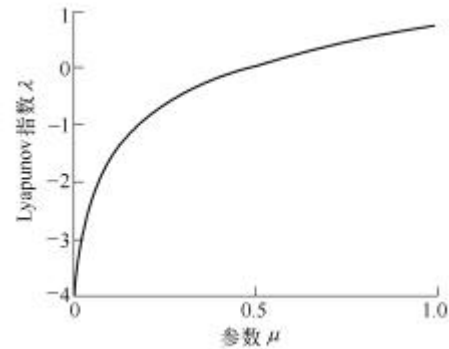


图2 帐篷函数 Lyapunov 指数随  $\mu$  的变化

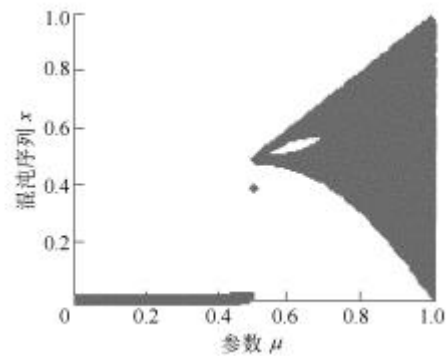


图3 一维映射帐篷函数分岔图

由此可按式(3)改变三角载波信号的周期, 实现 CSPWM。图 4 是 CSPWM 策略的调制波、载波及 PWM 输出波形。

将 CSPWM 应用于三相电压型逆变器。图 5a 和图 5b 给出 CSPWM 和 SPWM 输出信号试验波形, 试验输出波形是基于 87C196MC 单片机实现的。脉冲生成采用了规则采样法, 三相 PWM 波形由 87C196MC 的片内波形发生器 WFG 产生。

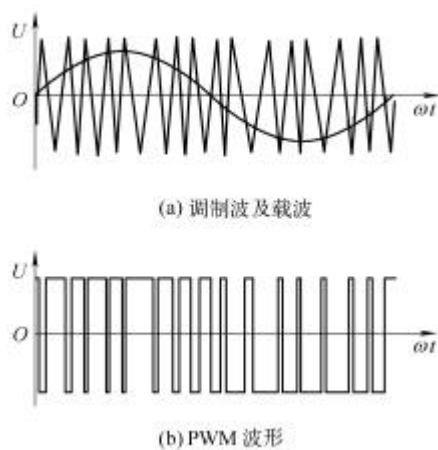


图 4 CSPWM 波形

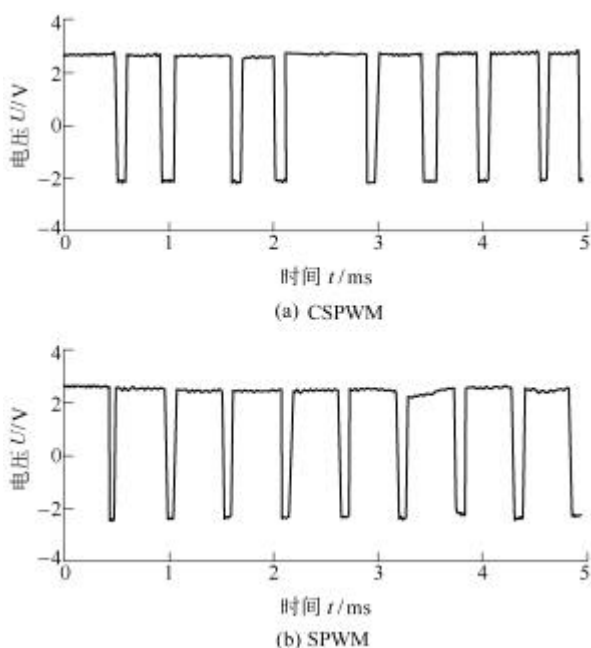


图 5 CSPWM 和 SPWM 输出信号试验波形

图 6a 和图 6b 分别对应于 CSPWM 和 SPWM 控制逆变器输出的相电压  $U_1$  和线电压  $U_2$  频谱特性曲线。这里  $U_d$  为逆变器直流输入电压，正弦调制波频率  $f_r=50$  Hz，调制度为 0.8，SPWM 三角载波频率  $f_c=1.8$  kHz，而对于 CSPWM，式(4)取  $\mu=0.8$  时的混沌序列。

从图 6 可见，由于 SPWM 载波频率  $f_c$  是固定的，因而在载波频率  $f_c$  及其倍频附近存在幅值较大的谐波。CSPWM 的输出电压基波幅值与 SPWM 相近，而谐波成分连续分布在一个较宽的频率范围内，谐波幅值明显下降。

### 3 结论

在混沌理论的基础上提出了一种新型 PWM 原理——CSPWM，它有以下特点。

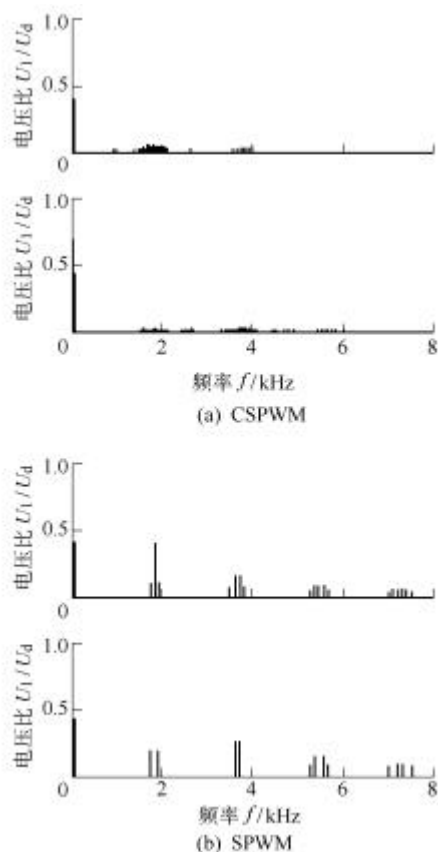


图 6 电压型逆变器输出的相电压和线电压频谱

(1) 与常规 SPWM 相比，它将逆变器电压、电流谐波连续均匀分布在较宽的频带范围内，各次谐波幅值大大减少，提高了逆变器的性能。

(2) 与常规 SPWM 相比，载波频率较低，降低逆变器的开关频率，提高了逆变器的可靠性。

(3) 与随机 SPWM 相比，载波频率的变化规律可以用确定的方程描述，易于在实际中应用和实现。

(4) CSPWM 可以用单片机方便地实现。

### 参 考 文 献

- [1] 黄礼文, 王宗培. 电动机噪声理论与控制技术的进展[J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 34-38.
- [2] 周启章. 交流逆变器供电鼠笼式异步电动机的噪声[J]. 电机设计, 1995, 3: 3-5.
- [3] TRZYNADLOWSKI A M, PEDERSEN J K, LEGOWSKI S. Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive system — a review[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30 (5): 1
- [4] 孙永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] WONG H, CHAN Y, MA S W. Electromagnetic interference of switching mode power regulator with chaotic frequency modulation: proc. 23rd International Conference on Microelectronics, Nis, Yugoslavia, May 2002[C]. c2002:

577-580.

- [6] BELLINI A, FRANCESCHINI G, ROVATTI R, et al. Generation of low-EMI PWM patterns for induction motor drives with chaotic maps : the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001[C]. c2001 : 1 527-1 532.
- [7] CALLEGARI S, ROVATTI R, SETTI G. Spectral properties of chaos-based FM signals: theory and simulation results[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-1: Fundamental Theory and Applications, 2003,
- [8] 张波, 李忠, 毛宗源, 等. 电机传动系统的不规则运动和混沌现象初探[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (7) : 40-45.
- [9] HABETLER T G, DIVAN D M. Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier [J]. IEEE Trans. Power Electron., 1991, 6 (3) : 356-363.
- [10] 余群明, 王耀南. 类噪声混沌编码在图像联想记忆中的应用研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (11) : 16-21.

## GENERATION OF CHAOS-BASED SPWM AND ANALYSIS OF ITS SPECTRAL PROPERTY FOR SUPPRESSION OF HARMONICS

LU Yimin<sup>1</sup> ZHANG Bo<sup>2</sup> MAO Zongyuan<sup>3</sup>

(1. College of Electric Engineering, Guangxi University, Nanning 530004;

2. College of Electrical Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640;

3. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

**Abstract** : There exists cluster harmonics around the multiples of carrier frequency in conventional sinusoidal pulse width modulation (SPWM) output waves. A new strategy for generation of Chaos-based SPWM (CSPWM) is proposed with the aim of reduction harmonic. A one-dimensional tent map is used to vary the frequencies of the triangular carrier wave so that the harmonics can be distributed continuously and equably over a wide frequency range. The new proposed CSPWM scheme is applied to a voltage source inverter. Research results show that it is effective on suppression of harmonics, moreover, it is easy to realize by microprocessor.

**Key words** : PWM Chaos Harmonic

作者简介：陆益民，1970年出生，博士，副教授。主要研究方向为现代控制理论及应用和交流传动系统的混沌现象及控制。

E-mail : aulym@163.com