

正弦脉宽调制技术开关时间点精度分析

刘晓东, 徐 弢

(安徽工业大学 电气信息学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 自然采样法产生的 SPWM 脉冲效果最接近正弦波, 但工程中不利于实时控制, 在实际中常采用的规则采样法精度不够高。基于正弦脉宽调制技术, 在规则采样的基础上准确推导了切线法和割线法的开关时间点计算公式。对开关开通和关断时刻的精度进行分析, 并对各开关时间点进行了比较, 公式得出的数据表明利用切线法和割线法产生的 SPWM 脉冲最接近于自然采样法产生的脉冲, 开关时间点误差小于规则采样法。利用 Matlab 软件进行仿真, 验证了其谐波含量小于规则采样法。

关键词: SPWM; 规则采样; 切线采样; 割线采样

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0055-05

自然采样法是目前最好的一种 SPWM 实现方法, 产生的脉冲最接近于正弦波, 但是在算法中需要计算复杂的超越方程, 不利于工程应用^[1-5]。本文针对几种采样法从理论上推导出开关开通和关断时间, 并对时间点的精度与自然采样法进行了比较。

1 自然采样法和规则采样法

1.1 自然采样法

根据 SPWM 控制基本原理, 在正弦波和三角波的自然交点时刻控制功率开关器件的通断, 这种生成 SPWM 波形的方法称为自然采样法^[6-7]。

如图 1 所示, $u_r = U_M \sin \omega t$ 作为调制波, 对称等腰三角形为载波, 取正弦波和三角波的交点作为开关的开通和关断时刻, 即图中 A 点为开关导通时刻 t_{on} , B 点为开关关断时刻 t_{off} , 这种方法产生的 SPWM 脉冲最大限度地逼近正弦规律, 可准确求出每一个脉冲的发生时刻及宽度, 得到非常好的 SPWM 波形。可以推出开关开通时间点计算公式为

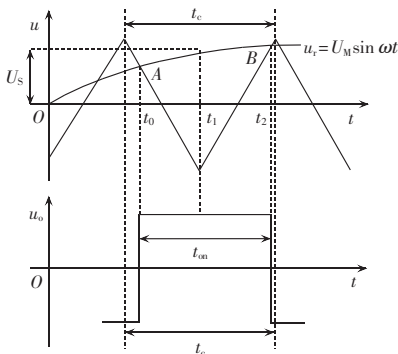


图 1 自然采样法
Fig.1 Natural sampling method

$$f(t) = M \sin t + 4Nt / \pi - 4k + 1 = 0 \quad (1)$$

其中, N 为 1 个周期内采样点数, k 为采样点序列。

但由于此数学模型是一个超越方程, 微处理机求解困难^[8], 采样点不能预先确定, 只能通过数值迭代求解, 实时控制较难, 不符合全数字控制要求, 因此该方法目前仅用于模拟控制的场合。

1.2 规则采样法

1.2.1 对称规则采样法

对称规则采样法产生的 SPWM 波形比较接近于自然采样法, 且计算量比自然采样法小许多, 因此在工程实际中应用较广^[9-10]。对称规则采样的基本思想是使 SPWM 波的每个脉冲均以三角载波中心线为轴线对称, 因此在每个载波周期内只需 1 个采样点就可确定 2 个开关切换点时刻。下面介绍其原理。

如图 2 所示, 在三角波载波的 1 个周期内, 取载波的谷底时刻 t_1 作为采样点, AC 与正弦波相交于点 C, 过 C 作平行于时间轴的直线, 与载波相交于 2 点, 以点 B 作分析, 设左侧峰值点为 E, 过其作时间轴的平行线与 AC 延长线交于点 D, 从图形中可得 $\triangle ABC \sim \triangle AED$, 令 U_M / U_s 为调制比, 以 M 替代, 可得:

$$t_{on1} = BC = t_c (1 + M \sin \omega t_0) / 4 \quad (2)$$

又因为是对称规则采样, 所以 $t_{on1} = t_{on2}$, 开关开通

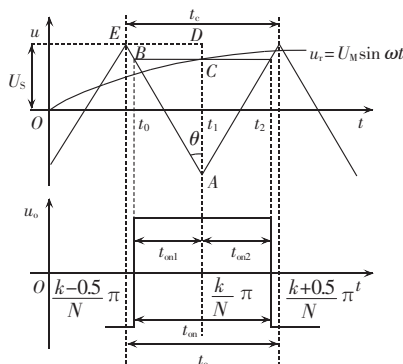


图 2 对称规则采样法

Fig.2 Symmetrical regular sampling method

时间为

$$t_{on} = t_{on1} + t_{on2} = 2t_{on1} = t_c(1 + M \sin \omega t_0)/2 \quad (3)$$

在 1 个载波周期内,开始时刻取 $\frac{k-0.5}{N} \pi, t_1$ 时刻取 $\frac{k}{N} \pi$,可以求得直线 AE 方程为 $l_{AE}: y = -\frac{4N}{\pi}x + 4k - 1$,直线 BC 方程为 $l_{BC}: y = M \sin \frac{k}{N} \pi$,联立方程得:

$$x = t_0 = t_{on} = -\frac{1}{4} \pi \left(M \sin \frac{k}{N} \pi - 4k + 1 \right) / N \quad (4)$$

同理可得:

$$t_{off} = \frac{1}{4} \pi \left(M \sin \frac{k}{N} \pi + 4k + 1 \right) / N \quad (5)$$

1.2.2 不对称规则采样法

对称规则采样法只在三角波的谷点位置对正弦波采样而形成阶梯波,由于每个载波周期只采样 1 次,因此所形成的阶梯波与正弦波的逼近程度存在较大的误差。如果既在三角波的顶点位置采样,又在三角波的底点位置采样^[11],即每个载波周期采样 2 次,这样形成的阶梯波与正弦波的逼近程度会大幅度提高。此方法称为不对称规则采样法。

如图 3 所示,在三角波载波的 1 个周期内,分别取载波的顶点和谷点作为采样时刻,先以顶点 E 为例,过 E 点作时间轴的垂线,交正弦调制波于 G 点,过 G 点作平行于时间轴的直线,交载波于点 B ,交以谷点作的垂线于 C 点,取 B 点为开关开通时刻,从图中可得 $\triangle ABC \sim \triangle AEF$, t_{on1} 和 t_{on2} 的表达式同规则采样法,开关开通时间为

$$t_{on} = t_{on1} + t_{on2} = \frac{t_c}{2} \left[1 + \frac{M}{2} (\sin \omega t_1 + \sin \omega t_2) \right] \quad (6)$$

由前面分析已知直线 AE 、 CG 方程:

$$l_{AE}: y = -\frac{4N}{\pi}x + 4k - 1; \quad l_{CG}: y = M \sin \frac{k-0.5}{N} \pi$$

联立方程得开关的开通时刻为

$$x = t_0 = t_{on} = -\frac{1}{4} \pi \left[M \sin \left(\frac{1}{2} \frac{2k-1}{N} \pi \right) - 4k + 1 \right] / N \quad (7)$$

同理可得开关关断时刻为

$$x = t_2 = t_{off} = \frac{1}{4} \pi \left[M \sin \left(\frac{1}{2} \frac{2k+1}{N} \pi \right) + 4k + 1 \right] / N \quad (8)$$

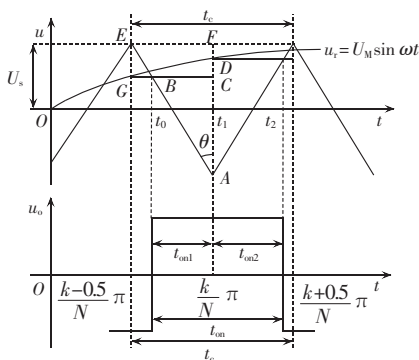


图 3 不对称规则采样法

Fig.3 Asymmetrical regular sampling method

2 切线法和割线法

规则采样法计算复杂度较低,但谐波含量较大。切线法和割线法是 2 种改进采样法,可使 SPWM 谐波降低,现有文献并未给出开关开通和关断时刻的计算公式,下文将给出其详细推导计算过程。

2.1 切线采样法

2.1.1 切线法原理

切线法是在采样点时刻(谷底)作调制波的切线,通过切线和载波的交点来确定开关开通和关断时刻^[12]。

2.1.2 开关时间点推导

如图 4 所示,过以载波周期的中点 t_0 时刻为采样点的 C 点作正弦调制波的切线 l ,交载波于 B 、 D 2 点,取 B 、 D 2 点作为开关管开通和关断时刻^[13]。

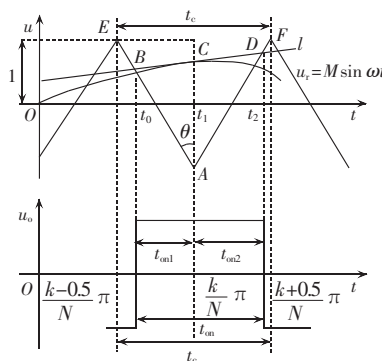


图 4 切线采样法

Fig.4 Tangent sampling method

为计算方便起见,设载波峰值为 1,调制波为 $u_r = M \sin \omega t$,令 $\omega t = \theta(k)$,得直线 l 方程为

$$y = M \cos \theta(k) - M \theta(k) \cos \theta(k) + M \sin \theta(k) \quad (9)$$

在 1 个载波周期内,开始时刻取 $\frac{k-0.5}{N} \pi, t_1$ 时刻取 $\frac{k}{N} \pi$,又已知直线 AE 、 AF 方程,联立方程求解得:

$$t_0 = t'_{on} = \pi \frac{M \theta(k) \cos \theta(k) - M \sin \theta(k) + 4k - 1}{\pi M \cos \theta(k) + 4N} \quad (10)$$

$$t_2 = t'_{off} = \pi \frac{M \theta(k) \cos \theta(k) - M \sin \theta(k) - 4k - 1}{\pi M \cos \theta(k) - 4N} \quad (11)$$

因为直线 l 过 $(\theta(k), M \sin \theta(k))$,所以 $\theta(k) =$

$\frac{k}{N} \pi$,得:

$$t_0 = t'_{on} = \pi \times \frac{4kN - N + \pi M \cos(k \pi / N)k - M \sin(k \pi / N)N}{N[\pi M \cos \theta(k) + 4N]} \quad (12)$$

$$t_2 = t'_{off} = \pi \times \frac{-4kN - N + \pi M \cos(k \pi / N)k - M \sin(k \pi / N)N}{N[\pi M \cos(k \pi / N) - 4N]} \quad (13)$$

2.2 割线采样法

2.2.1 割线采样法原理

在调制波的采样点时刻取一点,过此点连接调制波与载波的交点作一条直线,此直线为正弦波的

割线,与载波的交点作为开关管开通、关断时刻。

2.2.2 开关时间点推导

上述切线法在 1 个载波周期内需要一条直线方程,下面所述的割线法在 1 个载波周期内有 2 条直线。下文介绍其原理。

如图 5 所示,正弦波与载波对称轴的交点为 B ,过谷底 A 点作垂直于时间轴的直线交正弦波于点 D ,连接 B 、 D 2 点得直线 l ,直线 l 交载波于 C 点,现取 C 点作为开关开通时刻 t''_{on} ,取 t_0 时刻为 $\frac{k}{N}\pi$,则 B

点坐标为 $(\frac{k-0.5}{N}\pi, M\sin\frac{k-0.5}{N}\pi)$, D 点坐标为

$(\frac{k}{N}\pi, M\sin\frac{k}{N}\pi)$, 则直线 l 的方程为

$$\frac{y-M\sin\frac{k}{N}\pi}{x-\frac{k}{N}\pi}=\frac{M(\sin\frac{k-0.5}{N}\pi-\sin\frac{k}{N}\pi)}{\frac{k-0.5}{N}\pi-\frac{k}{N}\pi}$$

由前面已知直线 AE 的方程,联立方程组求解得:

同理可得开关关断时刻:

$$x=t_0=t''_{on}=\frac{1}{2}\pi\frac{4k-1-M\sin(\frac{k}{N}\pi)+2Mk\sin(\frac{k}{N}\pi)-2Mk\sin[\frac{1}{2}(2k-1)\frac{\pi}{N}]}{N\{2+M\sin(\frac{k}{N}\pi)-M\sin[\frac{1}{2}(2k-1)\frac{\pi}{N}]\}} \tag{14}$$

$$x=t_2=t''_{off}=\frac{1}{2}\pi\frac{4k+1+M\sin(\frac{k}{N}\pi)+2Mk\sin(\frac{k}{N}\pi)-2Mk\sin[\frac{1}{2}(2k+1)\frac{\pi}{N}]}{N\{2+M\sin(\frac{k}{N}\pi)-M\sin[\frac{1}{2}(2k+1)\frac{\pi}{N}]\}} \tag{15}$$

表 1 开关时间点时刻计算
Tab.1 Calculation of switching time point

算法	$k=1$		$k=2$		$k=3$		$k=4$		$k=5$	
	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}
自然采样	0.244 87	0.467 81	0.573 02	0.837 26	0.905 03	1.199 52	1.242 90	1.553 33	1.588 26	1.898 69
对称规则	0.237 92	0.460 21	0.565 99	0.830 27	0.899 47	1.194 92	1.240 24	1.552 28	1.589 31	1.901 35
不对称规则	0.249 68	0.471 24	0.575 96	0.838 88	0.906 45	1.200 07	1.243 39	1.553 34	1.588 25	1.898 20
切线采样	0.244 76	0.468 01	0.572 70	0.837 74	0.904 45	1.200 27	1.242 11	1.554 20	1.587 40	1.899 48
割线采样	0.244 94	0.467 71	0.573 13	0.837 13	0.905 15	1.199 41	1.243 01	1.553 24	1.588 36	1.898 58

算法	$k=6$		$k=7$		$k=8$		$k=9$	
	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}	t_{on}	t_{off}
自然采样	1.942 07	2.236 57	2.304 34	2.568 58	2.673 78	2.896 72	3.047 79	3.223 17
对称规则	1.946 67	2.242 12	2.311 32	2.575 60	2.681 38	2.903 67	3.054 33	3.228 86
不对称规则	1.941 53	2.235 14	2.302 71	2.565 63	2.670 35	2.891 92	3.042 20	3.216 74
切线采样	1.941 33	2.237 14	2.303 85	2.568 89	2.673 58	2.896 83	3.047 78	3.223 16
割线采样	1.942 18	2.236 44	2.304 47	2.568 48	2.673 89	2.896 66	3.047 81	3.223 20

表 2 精度误差比较
Tab.2 Comparison of precision error

算法	$k=1$		$k=2$		$k=3$		$k=4$		$k=5$	
	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}
对称规则	-2.838 2	-1.624 6	-1.226 8	-0.834 9	-0.614 3	-0.383 5	-0.214 0	-0.067 6	0.066 1	0.140 1
不对称规则	1.964 3	0.733 2	0.513 1	0.193 5	0.156 9	0.045 9	0.039 4	0.000 6	-0.000 6	-0.025 8
切线采样	-0.044 9	0.042 8	-0.055 8	0.057 3	-0.064 1	0.062 5	-0.063 6	0.056 0	-0.054 1	0.041 6
割线采样	0.028 6	-0.021 4	0.019 2	-0.015 5	0.013 3	-0.009 2	0.008 9	-0.005 8	0.006 3	-0.005 8

算法	$k=6$		$k=7$		$k=8$		$k=9$	
	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}	e_{on}	e_{off}
对称规则	0.236 9	0.248 1	0.302 9	0.273 3	0.284 2	0.239 9	0.214 6	0.176 5
不对称规则	-0.027 8	-0.063 9	-0.070 7	-0.114 8	-0.128 3	-0.165 7	-0.183 4	-0.199 5
切线采样	-0.038 1	0.025 5	-0.021 3	0.012 1	-0.007 5	0.003 8	-0.000 3	-0.000 3
割线采样	0.005 7	-0.005 8	0.005 6	-0.003 9	0.004 1	-0.002 1	0.000 7	0.000 9

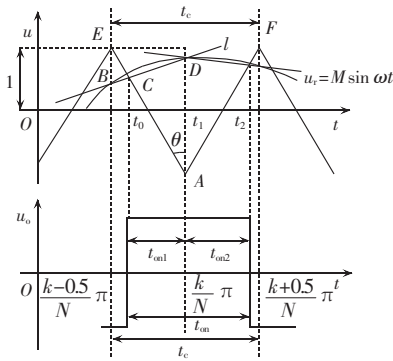


图 5 割线采样法
Fig.5 Secant sampling method

3 算法精度的比较

上述分析了规则采样法、切线法和割线法的开关时间点计算公式,下面对这几种算法的时间点(t_{on} 、 t_{off})以及其精度误差(e_{on} 、 e_{off})进行比较(见表 1、2)。

为了便于计算以及消除高次谐波,改善逆变电

路输出电压波形的正弦性,并大幅度减小所需的 LC 滤波器,取 $N=9$,则载波比为 18, $M=0.8$, K 取 1~9 的情况下开关时间点进行计算。

从表格中可以看出,对称规则采样法相比较于自然采样法,其误差较大;而不对称规则采样法在 $3 \leq k \leq 6$ 之间的时间点误差较小,在 $k < 3$ 以及 $k > 6$ 时,误差逐渐增大;而切线采样法和割线采样法在 k 取 1~9 时,误差大部分能控制在 0.001%~0.01%,在切线法和割线法的比较中可以看出割线法总体精度高于切线法,验证了在 $N \leq 11$ 时割线法优于规则法和切线法。时间点精度可以满足控制要求,产生的 SPWM 谐波较小,适用于工业现场控制。用图形的方式局部放大比较显示(见图 6)。

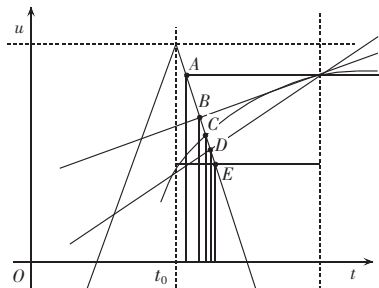


图 6 各种采样法开关时间点比较

Fig.6 Comparison of switching time point between different methods

图 6 中, A 点为对称规则采样法的时间点, B 点为切线采样法, C 点为自然采样法, D 点为割线采样法, E 点为不对称规则采样法,从图中也可以看出来,切线采样法和割线采样法效果明显好于规则采样法。

4 几种 SPWM 波形的频谱分析

下面对几种算法生成的 SPWM 波形进行傅里叶变换,利用 Matlab 中 powergui 模块的 FFT 功能进行波形频谱分析。输出采用二阶低通滤波器进行滤波,截止频率设为 3 倍正弦周期,载波比取 18,滤波之前的 SPWM 脉冲谐波含量非常高^[14],通过滤波后自然采样法的 SPWM 波形如图 7 所示。

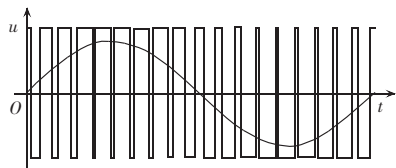


图 7 自然采样法 SPWM 和对应的正弦波

Fig.7 Natural sampling SPWM and corresponding sine wave

自然采样法的 SPWM 脉冲频谱如图 8 所示(图中纵坐标为谐波含量,因基波含量很大,在图中没有全部显示, n 为谐波次数;下同)。

理想的 SPWM 波形滤波后 $THD=0$,但由于本文仿真时载波比为 18,正弦波周期为 2π ,频率较低,所以滤波后的 THD 值大约为 3%。

图 8 中设置的频率观察范围为 40 次谐波,可以

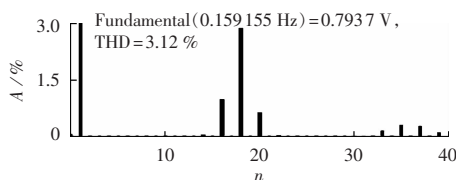


图 8 自然采样法 SPWM 频谱

Fig.8 Spectrum of natural sampling SPWM

清楚地看到谐波的分布情况。谐波聚集在以 18 次及其整数倍次谐波为中心所形成的双边频带上,其中最为严重的是 18 次谐波,以及 16、20、33、35、37、39 次等高次谐波,其他谐波分量很小^[15]。

对其他 4 种方法采样得出的脉冲进行频谱分析可知谐波总体相差不大,对称规则采样法的 THD 为 3.21%,不对称规则采样法的 THD 为 3.17%,切线采样法的 THD 为 3.12%,割线采样法 THD 为 3.12%。仿真结果见图 9~12。

从仿真中可知不对称规则法、切线法和割线法的 17、19 次谐波明显低于规则采样法,而切线法和割线法在 40 次谐波之内的 THD 值总体好于规则采样法。在对输出正弦波形要求较高的场合下优先考虑采用切线法和割线法。

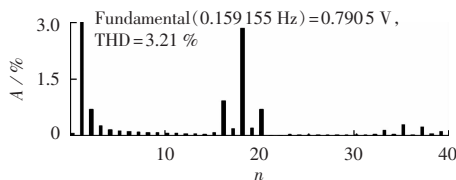


图 9 对称规则采样法频谱图

Fig.9 Spectrum of symmetrical regular sampling method

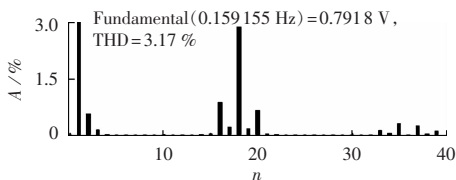


图 10 不对称规则采样法频谱图

Fig.10 Spectrum of asymmetrical regular sampling method

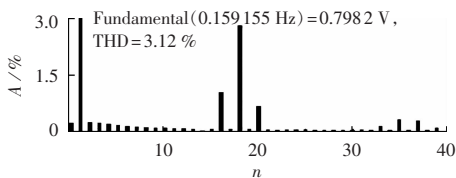


图 11 切线采样法频谱图

Fig.11 Spectrum of tangent sampling method

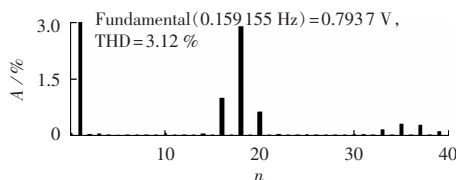


图 12 割线采样法频谱图(基波单位为 V)

Fig.12 Spectrum of secant sampling method

5 结论

本文给出了割线采样法和切线采样法开关时间点计算公式,与自然采样法、规则采样法、不规则采样法进行了精度比较分析,从数据中可以看出割线采样法和切线采样法产生的 SPWM 脉冲更加接近于自然采样法,精度误差更小。进一步通过仿真进行谐波分析,仿真结果表明切线法和割线法产生的 SPWM 谐波分量低于传统规则采样法,输出的波形更接近于正弦波。同时切线法和割线法的算法在数字控制中不是很难实现,在控制复杂度和精确度方面可以根据实际情况来选择采用哪种方法,所以可以在工程中广泛使用。

参考文献:

- [1] WANG Mingyu, HUI Yaqian, XIAN Chengyu. One-cycle control based voltage source inverter[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China; IEEE, 2005; 1176-1180.
- [2] HAMMAN J, van der MERWE F S. Voltage harmonics generated by voltage-fed inverters using PWM natural sampling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(3): 297-302.
- [3] ISMAIL B, TAIB S, SAAD A R M. Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter[C]//2006 First IEEE International Power and Energy Conference. Putra Jaya, Malaysia; IEEE, 2006: 437-440.
- [4] 陈增禄, 毛惠丰, 周炳根, 等. SPWM 数字化自然采样法的理论及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 32-37.
CHEN Zenglu, MAO Huifeng, ZHOU Binggen, et al. A study on theory and application of digital natural sampling based SPWM [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 32-37.
- [5] 毛惠丰, 陈增禄, 任记达, 等. SPWM 数字化自然采样法的理论及脉冲误差分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 131-136.
MAO Huifeng, CHEN Zenglu, REN Jida, et al. Theory and pulse error study of digital natural sampling based SPWM [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 131-136.
- [6] CHRISTIANSEN C F, HERRADA J L, MARTINEZ N H. Further improvements in a three phase sine wave generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 1988, 5(2): 338-339.
- [7] 吴忠, 李红, 左鹏, 等. 自然采样 SPWM 逆变电源的谐波分析及抑制策略[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 17-20.

- WU Zhong, LI Hong, ZUO Peng, et al. Analysis and restraint of harmonics for inverting power supplies using natural sampling SPWM[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 17-20.
- [8] ZHENG Chunfang, ZHANG Bo, QIU Dongyuan. Digital natural sampling SPWM based on inverse operator method[C]//IEEE 38th Annual Power Electronics Specialists Conference. Orlando, USA; IEEE, 2007: 792-797.
- [9] GUO Weinong, DUAN Shanxu, KONG Xuejuan, et al. A modified deadbeat control for single-phase voltage-source PWM inverters based on asymmetric regular sample[C]//2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference. Vancouver, Canada; IEEE, 2001: 962-967.
- [10] BOWES S R. Regular-sampled harmonic-elimination PWM control of inverter Drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(5): 521-531.
- [11] 李扶中, 熊蕊. 一种新型的不对称规则 SPWM 采样法[J]. 电力电子技术, 2007, 41(4): 93-95.
LI Fuzhong, XIONG Rui. A novel sampling method of SPWM with nonsymmetrical rules[J]. Power Electronics, 2007, 41(4): 93-95.
- [12] 张志学, 马皓, 何湘宁. 新型正弦脉宽调制采样方法的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(4): 588-594.
ZHANG Zhixue, MA Hao, HE Xiangning. Study on novel SPWM sampling methods[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(4): 588-594.
- [13] 赵伟杰. 基于切线技术的正弦脉宽调制算法[J]. 杭州电子科技大学学报, 2007, 27(4): 57-60.
ZHAO Weijie. SPWM control method based on tangent modulation[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2007, 27(4): 57-60.
- [14] XU Shungang. Analyzing and restraining on harmonic of the SPWM inverter[C]//2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Milpitas, USA; IEEE, 2009: 724-727.
- [15] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 79-83.

(编辑: 康鲁豫)

作者简介:

刘晓东(1971-), 男, 吉林通化人, 教授, 博士, 主要从事电力电子功率变换技术及电力系统微机保护方面的研究(E-mail: lxdong168@sina.com);

徐 骏(1986-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术及逆变并网技术(E-mail: xutao860811@163.com)。

Precision analysis of SPWM switching time point

LIU Xiaodong, XU Tao

(Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: As the natural sampling method generating SPWM pulses closer to sine wave is impractical in real-time control, the regular sampling method with poor precision is usually adopted in practical projects. Based on the sinusoidal pulse width modulation technology and the regular sampling method, the accurate switching time point calculation formula are derived for the tangent sampling method and secant sampling method. The precision of on-off switching moments are analyzed and the comparison of switching time point shows that, the SPWM pulses generated by the tangent method and secant method are closest to the pulses generated by the natural sampling method and their switching time point errors are smaller than those of the regular sampling method. Simulation with Matlab indicates that their harmonic contents are less than those of the regular sampling method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50877001) and the Science and Technological Fund of Anhui Province for Outstanding Youth(08040106809).

Key words: SPWM; regular sampling; tangent sampling; secant sampling