一种新的过零锁相方法

刘海春，徐立智，谢少军

（南京航空航天大学自动化学院，江苏 南京 210016）

摘要：在中频电网中，由于信号频率较高且偏移较大，传统的过零锁相往往难以获得准确的锁相结果。提出了一种新的过零锁相方法，即在电源信号的每个正向过零点通过对正弦表地址指针值与参考值之间的偏差进行 PI 调节，进而改变系统的采样周期，从而使锁相环的输出信号与电源信号保持同相。该方法能实现在预定采样率下系统采样时间的闭环控制，特别适用于信号频率较高且偏移较大的应用场合。建立了该方法的控制模型，并对其进行了分析。利用 DSP 实验平台及 400 Hz DVR 样机对该方法进行了实验验证。

关键词：锁相；动态电压恢复器；有源电力滤波器；采样时间；PI 调节

A new phase locking method with zero crossing

LIU Hai-chun，XU Li-zhi，XIE Shao-jun

（College of Automation Engineering，Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，Nanjing 210016，China）

Abstract：For the mid-frequency grid，the signal is characterized with a relatively high frequency and a big variation of frequency，it's difficult to obtain an ideal phase locking for the typical phase locking method with zero crossing．To cope with this problem，a new phase locking method with zero crossing is proposed，which changes the sampling period of system by adjusting the error of the practical and reference address pointer values of sine wave table at each zero crossing point with rising edge of signal through PI loop，thus the output signal of PLL will be in phase with source signal．The method realizes a close loop control of sampling time when the sampling rate is constant，which is suitable especially for signal with a relatively high frequency and a big variation of frequency．The control model of the method is built and analyzed．Finally the method is validated with a DSP experimental platform and a 400 Hz DVR prototype.

Key words：phase locking；DVR；APF；sampling time；PI adjusting

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)19-0147-04

0 引言

在并网逆变器[1]、电能质量控制器如动态电压恢复器（DVR）[2-3]、有源电力滤波器（APF）[4-5]等设备的研究应用中，锁相技术是一个基础性的技术。在现有的锁相技术中，传统的过零锁相[6]实现简单，辅以滞环比较电路可以明显提升在过零点的抗干扰性。因此，过零锁相仍然是目前应用最为广泛的锁相技术。软件锁相环（SPLL）[7]通过对三相输入电压信号进行 dq 变换，当锁相成功后 q 轴上的值 u_q 为 0，通过 u_q 与 0 的比较，从而实现对输入信号相位的闭环跟踪控制。软件锁相环的突出优点是不需要进行过零比较，且可以直接获得输入电压基波正序分量的相位。然而，由于锁相输出的相位角是通过对频率的积分而得到，因此每个信号周期必须对其进行复位一次。如果信号的频率发生变化，而程序仍然按照其设定好的周期进行复位，则会给锁相结果带来明显的误差[8]。此外，软件锁相环需要进行复杂的坐标变换，运算量较大。近年来，采用 APF、DVR 等设备提高航空电源系统的电能质量的研究得到了重视[9-10]。在中频电网中，由于信号频率较高且偏移较大，传统的过零锁相往往难以获得准确的锁相结果。本文以中频 DVR 中的锁相应用为例，提出了一种新的过零锁相方法，该方法通过 PI 调节可以自动改变系统的采样时间，从而实现信号的精确锁相。建立了系统的控制模型，并对该方法进行了实验验证。

1 新的过零锁相方法

1.1 过零锁相分析

过零锁相是通过波形转换电路将输入的正弦波信号转换为方波信号，并将该信号的正向过零点作

为一个周期的起点，引导其他信号与之保持同步，如图 1。

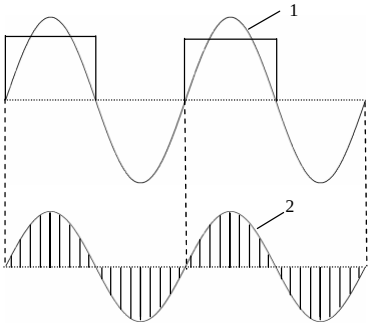


图 1 过零锁相波形

Fig.1 Waveforms of phase locking with zero crossing

以采用同相补偿策略[11]的 DVR 为例，图 1 中的信号 1 及 2 则分别可理解成电源输入电压及 DVR 补偿电压。在具体的程序中，信号 2 的输出是通过查找标准正弦表完成的，即在信号的正向过零点输出正弦表的起始点数据，之后每隔一个采样周期则依次增大正弦表的位置指针值。由此可见，当采样率确定后，存在两个因素会使得过零锁相出现偏差：（1）信号频率的偏移；（2）采样周期误差。为说明该问题，假设信号周期为 T_0，采样率为 N，则采样周期 T_s 为

$$T_s = \frac{T_0}{N} \qquad (1)$$

对于第一种情形，不妨假设信号频率偏大，则信号的实际周期 $T_0' < T_0$，而信号 2 的产生却是按 T_0 设计的，即每隔 T_0 / N 输出一个值，因此在 T_0' 时间内将无法完成 N 个点的输出，此时图 1 的波形将变成如图 2 所示。

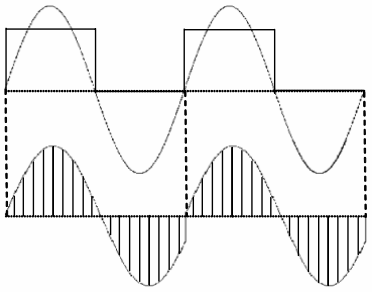


图 2 信号频率偏大对应的锁相波形

Fig.2 Waveforms of phase locking responding to a relatively high frequency

类似地，如果信号频率变小，将出现如图 3 所示的波形。

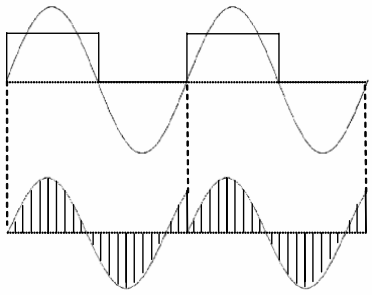


图 3 信号频率偏低对应的锁相波形

Fig.3 Waveforms of phase locking responding to a relatively low frequency

而如果系统采样周期偏大或偏小，也将出现类似的锁相偏差，其分析过程不再赘述。

对于工频电压信号，由于其频率变化范围为 50±0.5 Hz，即±1%，因此影响锁相精度的第一个因素基本可以忽略。而对于采样周期的误差，不妨假设采样率 N 为 128，则 T_s =（20 / 128）ms，如果采用主频为 30 MHz 的 DSP 芯片，则该采样周期对应的定时器周期值 T_{PR} 如式（2）。

$$T_{PR} = \frac{20/128}{1/30} \times 1000 = 4688 \qquad (2)$$

一般而言，在数字芯片中，考虑到定时器中断的响应时间以及时序误差，定时器周期值越大，其定时误差越小。就工频信号而言，上述的 T_{PR} 值较大，因此系统的采样周期的误差也基本可以忽略。

然而，对于频率较高且偏移较大的应用场合，如中频 400 Hz 航空电源，其频率的变化范围为±5%，考虑到影响锁相的第一个因素，这样的频率偏移显然会产生较大的锁相误差；再考虑第二个因素，仍然假设 N 为 128，则此时

$$T_{PR} = \frac{2.5/128}{1/30} \times 1000 = 586 \qquad (3)$$

该周期值相对于 16 位定时器的字长定时值 2^{16}=65536 而言非常小，因此定时精度难免会受到一定影响。

因此，在中频电源系统中，电压频率的波动及采样周期的定时误差对锁相构成的影响将不可忽略。

1.2 新的过零锁相方法

通常，希望在一个信号周期内的采样率保持不变，以适应信号的频谱分析等。因此，采样周期与信号周期之比应始终满足式（1）。考虑到导致锁相误差的两种因素，当信号频率发生偏移或采样周期出现误差时，系统的采样周期也应相应地作出调整。而在目前的系统设计中，采样周期往往是根据确定的信号频率及芯片机器周期来确定的，一旦设定后

就保持不变。换言之，对采样周期的控制是开环的。

显然，在频率较高且偏移较大的应用场合，这样的设计方法是不合适的，也会带来较大的锁相误差。

其实，在正确锁相的情况下，在电压的每个正向过零点，输出电压对应的正弦表的地址指针应指向一个完整正弦表中的最后一个数据，如果出现锁相误差，则地址指针的值将随之变化，如图 2、图 3 所示。因此，完全可以根据信号正向过零点处正弦表地址指针的值来确定正确的采样周期。

综上所述，本文提出了一种新的过零锁相方法，即在电压信号的每个正向过零点通过对正弦表地址指针值与参考值之间的偏差进行 PI 调节，进而改变系统的采样周期，以实现对电源电压的准确锁相，其原理框图如图 4 所示。

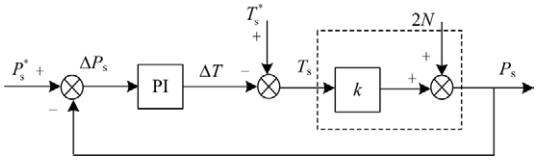


图 4 新的过零锁相控制

Fig.4 New phase locking with zero crossing

图 4 中各参数：P_s^* 为正确锁相时正弦表地址指针的位置；P_s 为正弦表地址指针的实际位置；T_s^* 为 400 Hz 信号的标准采样周期；T_s 为系统的实际采样周期；k 为 $-N/T_s^*$。

在图 4 中，对 P_s^* 和 P_s 的偏差进行 PI 调节，其输出作为采样周期的偏差量。图中虚线框内的原理可概述如下：

由图 2、图 3 可知 P_s 既可能位于 P_s^* 的左边，也可能位于 P_s^* 的右边，在实际的程序中，设计一个长度为（N+N / 4）的正弦表，如图 5。

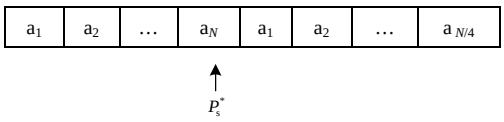


图 5 正弦表

Fig.5 Table of sine wave

图 5 中 a_i（i=1,2,…，N）为正弦表第 i 个元素。根据数学推导，可知

$$P_s = N\cdot\frac{T_s^*-T_s}{T_s^*}+N = 2N-N\cdot\frac{T_s}{T_s^*} = 2N+kT_s \qquad (4)$$

在图 4 中，当信号频率高于 400 Hz 时，由图 2 可知 $P_s < P_s^*$，则 ΔT 为正，从而使 $T_s < T_s^*$，采样周期自动减小，使 P_s 逼近 P_s^*。当 P_s 接近或等于 P_s^* 时，由于之前 P_s 与 P_s^* 的误差信号是单极性（或单向）变化的，因此尽管此时 ΔP_s 很小或等于零，但 PI 环节的输出并不为零，而是维持之前误差的积分值，该值也正好是 T_s^* 与实际采样周期的偏差量。显然，同样的调节过程也适用于信号频率低于 400 Hz 的情形。

在新的过零锁相方法中，将正弦表地址指针的实际最后位置 P_s 作为控制量，其实质是为了实现对采样周期 T_s 的微调，并形成闭环控制。

为考察该控制系统的稳定性，列出 P_s 对 P_s^* 的传递函数 $T(s)$ 如式（5）。

$$T(s)=\frac{P_s}{P_s^*}=\frac{k(k_p s+k_i)}{(kk_p+1)s+kk_i} \qquad (5)$$

式（5）中的极点为

$$s=\frac{-kk_i}{kk_p+1} \qquad (6)$$

由于 k<0，因此只要 $k_p > \frac{-1}{k}$ 则系统稳定，考虑到 $|k|$ 非常大，k_p 很容易满足要求。为考察该控制系统的控制性能，令 $T_s^* = 2.5$ ms，$N = 80$，$k_p = 0.1$，$k_i = 0.01$，可绘出 $T(s)$ 的频率响应曲线，如图 6。

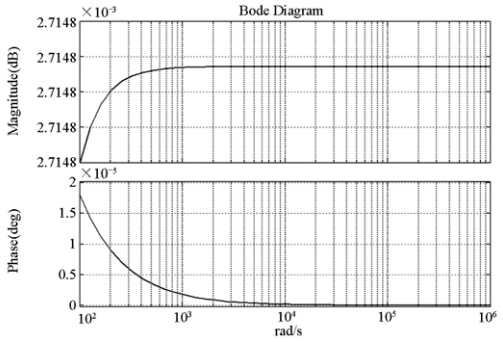


图 6 $T(s)$的频率响应曲线

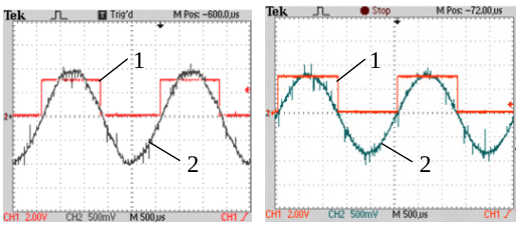
Fig.6 Waveforms of frequency response of $T(s)$

由图 6 中的幅频特性曲线可知，在 $\omega = 400\cdot 2\pi$ 即 2 512 附近，P_s 高度逼近 P_s^*，可以完成准确的锁相。

2 实验验证

为验证所提方法的正确性，首先在一台中频

DVR 样机上进行了实验测试。实验参数：电源频率为 400 Hz，电压有效值正常为 115 V，负载为 7 Ω 的阻性负载。实验波形如图 7，图中曲线 1、2 分别为输入电源电压波形转换得到的方波信号以及 DVR 输出电压波形。



t(500 μs/div)　　*t*(500 μs/div)

（a）传统过零锁相波形　（b）新的过零锁相波形

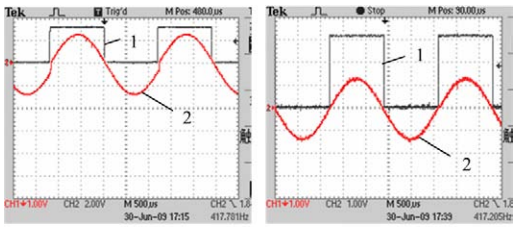
图 7 两种锁相方法的实验结果

Fig.7 Experimental results of the two phase locking methods

在图 7（a）中，锁相得到的 DVR 输出电压与电源电压存在一定的相位差，这一点在电压的负向过零点尤为明显。在对采样周期进行调整后，仍难以获得理想的锁相输出。这主要是由采样周期的误差导致的，如前所述，对于频率较高的信号，对采样周期的开环控制将很难满足式（1）。而在图 7（b）中，DVR 输出电压与电源电压保持了较好的同步，实现了准确的锁相，进一步验证了新的过零锁相方法的正确性。

其次为考察该方法在电压频率变化时的锁相性能，在一个 DSP 实验平台上对其进行了实验测试，其中电源电压信号由信号发生器提供，锁相输出信号由一片数模转换芯片 MAX7847 完成。实验结果分别如图 8、图 9，其中图 8 中的信号频率约为 417 Hz，图 9 中的信号频率约为 383 Hz，图中曲线 1、2 分别为输入电源电压波形转换得到的方波信号以及 MAX7847 输出的锁相电压波形。

由图 8、图 9 可知，当频率在 400 Hz 上下波动时，采用传统的过零锁相方法得到的锁相结果出现了较大的误差，且波形特征与图 2、图 3 是一致的。而基于新的过零锁相则实现了在变频条件下的准确锁相。

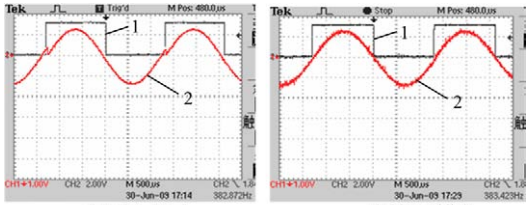


t(500 μs/div)　　*t*(500 μs/div)

(a) 传统过零锁相波形　(b) 新的过零锁相波形

图 8 电压频率为 417 Hz 时的锁相波形

Fig.8 Experimental results of phase locking when the frequency of voltage is 417 Hz



t(500 μs/div)　　*t*(500 μs/div)

(a) 传统过零锁相波形　(b) 新的过零锁相波形

图 9 电压频率为 383 Hz 时的锁相波形

Fig.9 Experimental results of phase locking when the frequency of voltage is 383 Hz

3 结论

(1) 传统的过零锁相方法在信号频率较高的应用场合难以获得理想的锁相效果，如果信号频率偏移则锁相结果将出现较大的误差。

(2) 新的过零锁相方法能实现在预定采样率下系统采样时间的闭环控制，特别适用于信号频率较高且偏移较大的应用场合。

(3) 实验结果验证了新的过零锁相方法的有效性。

参考文献

[1] 张承慧，叶颖，陈阿莲，等. 基于输出电流控制的光伏并网逆变电源[J]. 电工技术学报，2007，22（8）：41-45.
ZHANG Cheng-hui，YE Ying，CHEN A-lian，et al. Research on grid-connected photovoltaic inverter based on output current control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2007，22（8）：41-45.

[2] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Automation，1996，32（6）：1312-1321.

[3] FANG Zheng-peng. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，1998，13（6）：1174-1181.

[4] Nielsen J G，Newman M，Nielsen H，et al. Control and testing of a dynamic voltage restorer（DVR）at medium voltage level[J]. IEEE Trans on Power Electronics，2004，19（3）：806-813.

[5] 张秀娟，杨潮，唐志，等. 串联型电能质量控制器注入电压的研究[J]. 中国电机工程学报，2003，23（2）：16-21.
ZHANG Xiu-juan，YANG Chao，TANG Zhi，et al. The voltage injection analysis in series power quality controller[J]. Proceedings of the CSEE，2003，23（2）：16-21.

（下转第 159 页　continued on page 159）

Distribution，2007, 6（1）: 928-937.
[7] 孙丽萍，杨江天. 基于离散灰色模型的变压器油中溶解气体浓度预测[J]. 电力自动化设备，2006，26（9）：58-60.
SUN Li-ping，YANG Jiang-tian. Prediction of gas dissolved in transformer oil using discrete grey model[J]. Electric Power Automation Equipment，2006，26（9）：58-60.
[8] 马华林，李翠凤，张立燕. 基于灰色模型和自适应过滤的网络流量预测[J]. 计算机工程，2009，35（1）：130-132.
MA Hua-lin，LI Cui-feng，ZHANG Li-yan. Network traffic prediction based on grey model and adaptive filter[J]. Computer Engineering，2009，35（1）：130-132.
[9] 鲍枫，唐祯敏. 城市公共交通客运量修正灰色模型[J]. 北京交通大学学报，2005，29（3）：88-91.
BAO Feng，TANG Zhen-min. Modified grey model of passenger volume of city public traffic[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2005，29（3）：88-91.
[10] 唐杰明，刘俊勇，杨可，等. 基于灰色模型和最小二乘支持向量机的电力短期负荷组合预测[J]. 电网技术，2009，33（3）：63-68.
TANG Jie-ming，LIU Jun-yong，YANG Ke，et al. Short-term load combination forecasting by grey model and least square support vector machine[J]. Power System Technology，2009，33（3）：63-68.
[11] 沈路，王瑞，王春红. 生物降解复合材料降解性能预测灰色模型研究[J]. 天津工业大学学报，2008，27（2）：16-18.
SHEN Lu，WANG Rui，WANG Chun-hong. Grey model of biodegradability prediction of biodegradable composites[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University，2008，27（2）：16-18.
[12] 宫靖远，等. 风电场工程技术手册[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
[13] Wangdee W，Billinton R. Considering load-carrying capability and wind speed correlation of WECS in generation adequacy assessment[J]. IEEE Trans on Energy Conversion，2006, 21 (3): 734-741.
[14] Curve Fitting Toolbox for use with MATLAB[M]. The MathWorks. 2002.
[15] Branch M A，Coleman T F，Li Y. A subspace，Interior，and conjugate gradient method for large-scale bound-constrained minimization problems[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1999, 21(1).

收稿日期：2009-10-19；　修回日期：2009-12-28

作者简介：
李俊芳（1982-），女，博士研究生，研究方向为电力系统分析与规划；E-mail：jflii@126.com
张步涵（1950-），男，教授，博士生导师，研究方向为电力系统分析与规划、电能存储与电力安全等。E-mail：zzbbzh@ mail.hust.edu.cn

（上接第 150 页　continued from page 150）

[6] Kaura V，Blasko V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions[J]. IEEE Trans on Ind App，1997，33（1）：58-63.
[7] 李彦栋，王凯斐，卓放，等. 新型软件锁相环在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术，2004，24（8）：42-45.
LI Yan-dong，WANG Kai-fei，ZHUO Fang，et al. Application of soft phase locked loop technique in dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology，2004，24（8）：42-45.
[8] Naidu S R，Mascarenhas A W, Fernandes D A. A software phase-locked loop for unbalanced and distorted utility conditions[C]. //2004 International Conference on Power System Technology.Singapore: 2004：1055-1060.
[9] CHEN Dong-hua，GUO Tao，XIE Shao-jun，et al. Shunt active power filters applied in the aircraft power utility[C].// Power Electronics Specialists Conference. 2005：59-63.
[10] 徐立智，刘海春，谢少军. 一种动态电压恢复器研究[J]. 电力电子技术，2008，42（9）：6-8.
XU Li-zhi，LIU Hai-chun，XIE Shao-jun. Study on a dynamic voltage restorer[J]. Power Electronics，2008，42（9）：6-8.
[11] 周晖，齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术，2006，30（6）：23-29.
ZHOU Hui，QI Zhi-ping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology，2006，30（6）：23-29.

收稿日期：2009-09-25；　修回日期：2010-01-29

作者简介：
刘海春（1977-），男，讲师，博士研究生，研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用；E-mail：nuaalhc@nuaa.edu.cn
徐立智（1984-），男，硕士研究生，研究方向为电力电子技术；
谢少军（1968-），男，教授，博士生导师，研究方向为电力电子技术。