

基于非正交信号发生器的单相锁相环研究

提出了一种单相逆变电压的锁相算法，利用当前和前一周期的采样数据及锁相相位，构造电压矢量。引入PI控制器调节单相正弦信号和锁相相位的相位差，达到稳态时相位差为零的效果。该方法可广泛应用于单相不间断电源系统（UPS）及光伏逆变器等逆变电源。最后，通过Matlab仿真及样机实验验证了算法的可行性。

易龙强 黄詹江勇/厦门科华恒盛股份有限公司

0 引言

逆变电源的数字控制中，如何快速、精确地对电网电压相位进行实时检测，是整个控制系统中的重要基础。而单相电源系统中，由于只有一路市电电压信号，很难像三相电源系统通过三相电压组成电压矢量来实现数字锁相技术。

文献[1]给出了一种利用单相正弦电压信号构造两相正交电压信号的方法，通过相移90°来构造另一相电压。这种方法的缺点是需要存储过去90°的电压信号数据，占用了大量的芯片内存。并且需要预先知道电网电压的频率，在频率变化较大的场合不宜应用。

文献[2]提出了采用离散傅里叶变换的方法进行锁相，但该方法存在计算量太大，不适宜实时检测及控制，在CPU资源有限的场合实现困难。

二阶广义积分器（Second Order Generalized Integrator, SOGI^[3]）因其较好的信号噪声抑制能力及优良的动态性能，在三相和单相电压锁相应用中得到广泛的关注，但当其输入信号含有谐波时，锁相结果存在稳态误差^[4]。

本文提出了一种新的锁相算法，巧

妙利用市电正弦电压，通过数字采样、正弦变换等数字手段构造市电电压矢量。然后通过平面坐标变换，实现与三相数字逆变电源等效的单相数字逆变电源锁相方案。

1 单相市电电压矢量构造

单相电源难以实现三相电源的矢量锁相算法，其根本困难在于，单相电源只有一相，如果像三相一样构造出电压矢量则可以利用三相电源的数字锁相算法。

设单相市电电源电压为

$$u_0(t) = U_0 \angle 0^\circ = U_0 \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

设数字系统采样频率为 f_s ，则采样后的市电电压数字信号为

$$u_0(k) = U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} k\right) \quad (2)$$

那么，利用当前采样电平值与前一时间采样电平值组成电平矢量，即

$$\vec{u}_0(k) = \begin{pmatrix} u_0(k) \\ u_0(k-1) \end{pmatrix} \quad (3)$$

则 $\vec{u}_0(k)$ 在平面上形成轨迹如图1所示。随着时间变化信号幅值变化如图2所示。相位变化如图3所示。

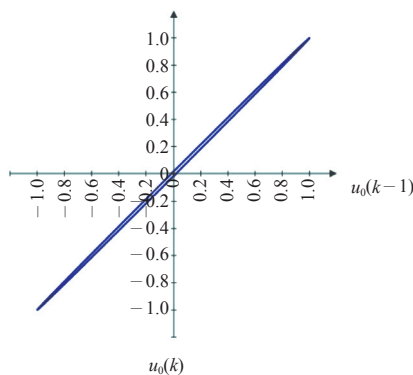


图1 $\vec{u}_0(k)$ 矢量图



易龙强/高级工程师

关键词/Keywords

数字锁相环 ·
逆变电源 ·
单相 ·

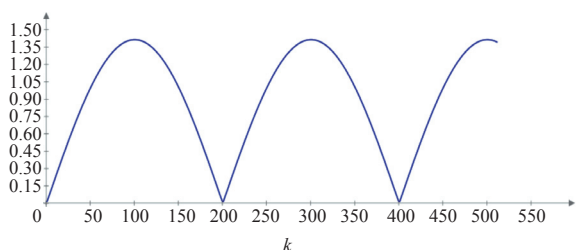


图2 $\vec{u}_0(k)$ 矢量幅值

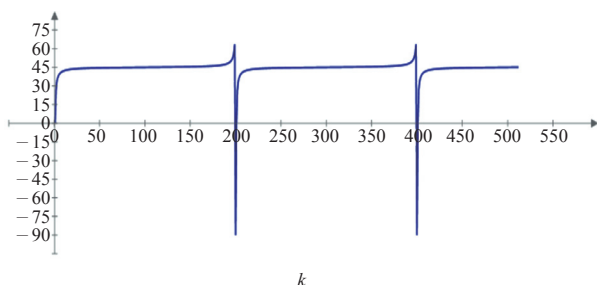


图3 $\vec{u}_0(k)$ 矢量相角

构造一个与市电相同的电平 $u_1(t) = \sin(\omega_1 t)$, 设数字系统采样频率为 f_s , 则离散后的数字信号为

$$u_1(k) = \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} k\right) \quad (4)$$

那么, 利用当前电平值与前一时间电平值组成电平矢量, 即

$$\vec{u}_1(k) = \begin{pmatrix} u_1(k) \\ u_1(k-1) \end{pmatrix} \quad (5)$$

则利用两矢量式 (3) 与式 (5) 的线性相关性可以构成单相正弦矢量的鉴相器

$$\begin{aligned} V_q &= |\vec{u}_1(k), \vec{u}_0(k)| \\ &= \begin{vmatrix} \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} k\right) & U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} k\right) \\ \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} (k-1)\right) & U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} (k-1)\right) \end{vmatrix} \\ &= U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} k\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} (k-1)\right) - \\ &\quad U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} k\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} (k-1)\right) \\ &= 2U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} k\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} k - \pi \frac{f_0 + f_1}{f_s}\right) \cdot \\ &\quad \sin\left(\pi \frac{f_1 - f_0}{f_s}\right) + U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_0 - f_1}{f_s} k\right) \quad (6) \end{aligned}$$

由于 $f_1 \approx f_0 \ll f_s$, 式中 $\sin\left(\pi \frac{f_1 - f_0}{f_s}\right) \approx 0$ 可以忽略不计, 于是

$$\begin{aligned} V_q &\approx U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_0 - f_1}{f_s} k\right) \\ &= U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s}\right) \cdot \sin(\theta_0 - \theta_1) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\theta_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s} k, \quad \theta_1 = 2\pi \frac{f_1}{f_s} k \quad (8)$$

将 V_q 输入 PI 控制器, 稳态时

$$V_q = U_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s}\right) \sin(\theta_0 - \theta_1) = 0 \quad (9)$$

则

$$\theta_0 = \theta_1 \text{ 或 } \theta_0 - \theta_1 = \pi \quad (10)$$

可见, $\theta_0 = \theta_1$ 和 $\theta_0 - \theta_1 = \pi$ 两种情况都满足, 因此锁相环输出相位和电网电压相位的差, 即 $\theta_0 - \theta_1$ 可能为 0 或 π 。但 $\theta_0 - \theta_1 = \pi$ 是一个不稳定平衡点, 因此当锁相环锁定电网电压相位时, 相位差为 0。

2 算法仿真

根据上述原理, 建立 Matlab 仿真模型, 如图 4 所示。

图 4 中黄色框为市电信号输入部分, 为了体现信号的真实性和稳定性, 在设计输入市电信号源加入一定比例的信号噪声与谐波。图 4 中绿色框部分为鉴相器模块, 可参照式 (6)。红色框为算法 PID 部分, 采用内建的数字 PID, 包括比例环节 P 和积分环节 I。其中, 采样频率 f_s 为 20 kHz, 比例系数 K_p 为 5, 积分系数 K_i 为 1 000。PI 控制器的输出限值为 ± 20 Hz。

设定市电频率为 50 Hz, 初始相位为 π , 电压有效值为 220 V, 未加入随机噪声信号与谐波信号。图 5~图 7 为信号锁相过程与其他各点关键信号波形。从图 5 和图 6 可以看出在 0.15 s 附近已经锁相到位 (实线为电网波形、虚线为锁相结果波形)。

为验证算法在各种情况下也能稳定, 在 52.5 Hz 信号下加入 5 V 随机噪声和 10% 的 2、4、6、8 和 10 次谐波, 各仿真波形如图 8~图 10 所示。

由于噪声与谐波的存在, 导致算法误差信号

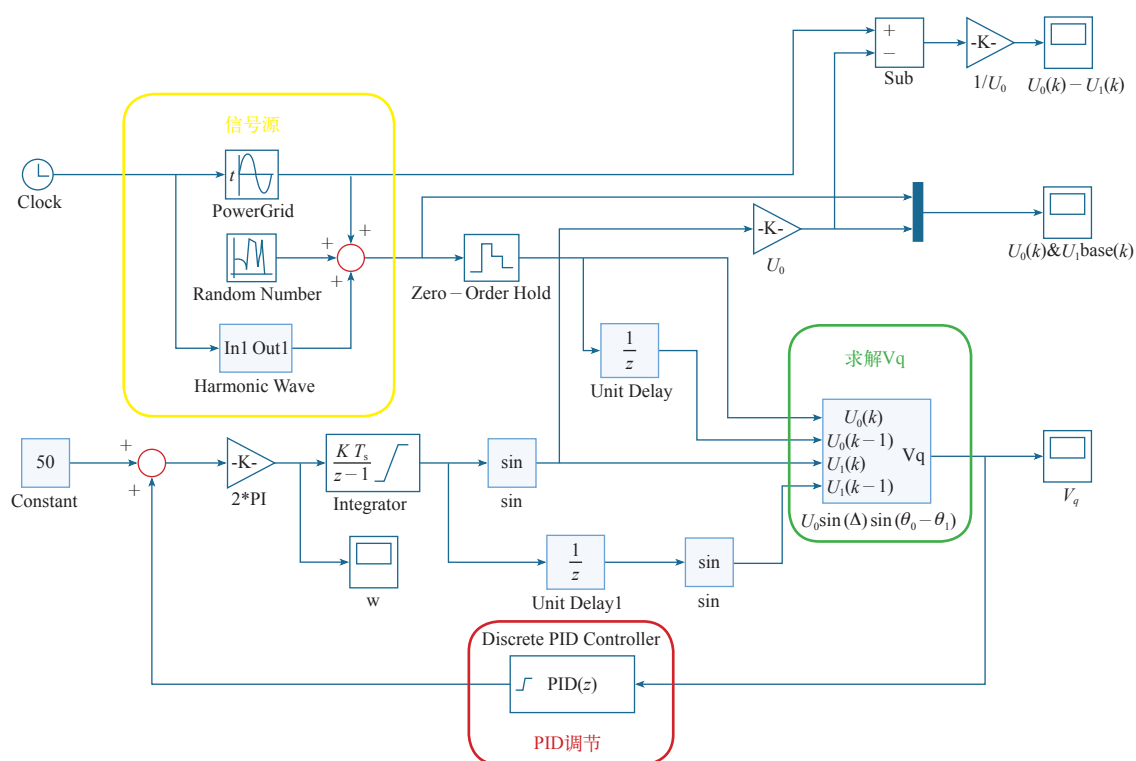


图4 单相市电锁相仿真模型

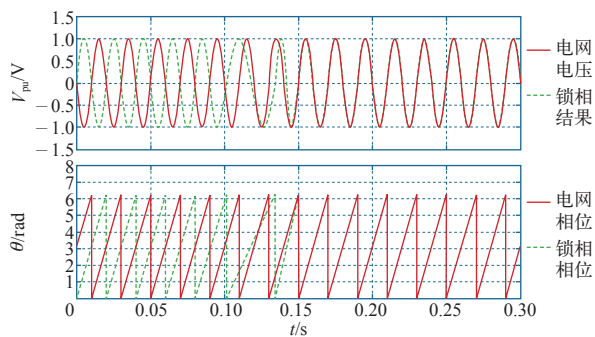


图5 信号锁相过程

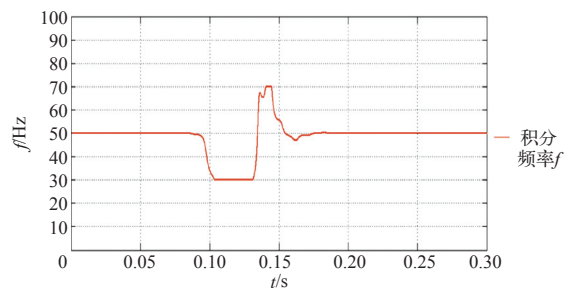


图7 数字积分器前的频率信号

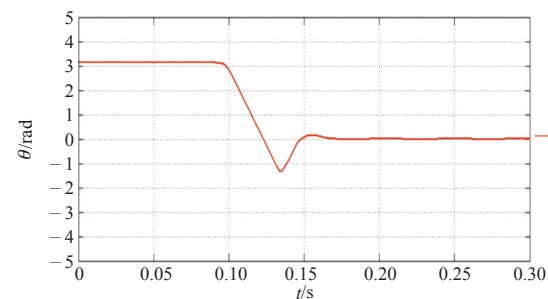


图6 锁相误差信号

存在波动, 不能完全趋近于零。但从图8信号锁相过程来看, 算法仍然是收敛的。图9表明在加入噪声和谐波后, 系统在0.2 s附近完成锁相功能。

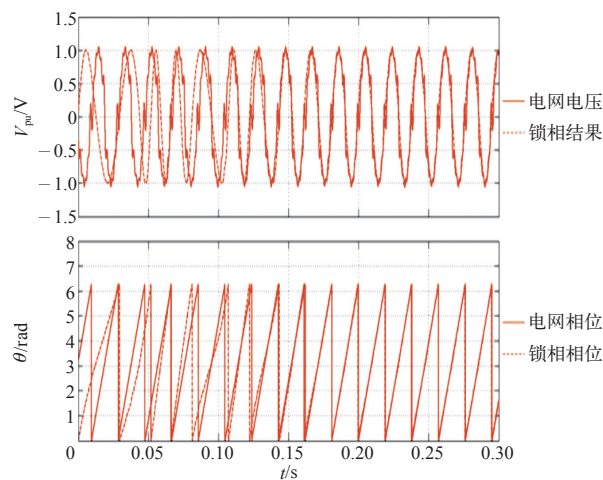


图8 信号锁相过程

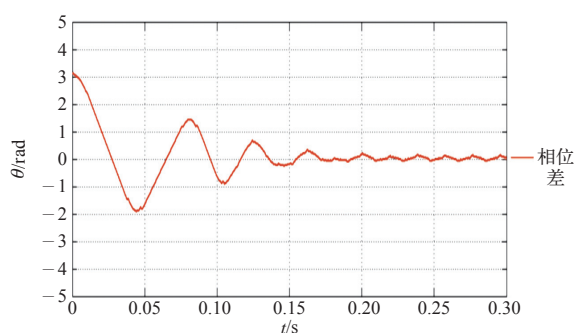


图9 锁相误差信号

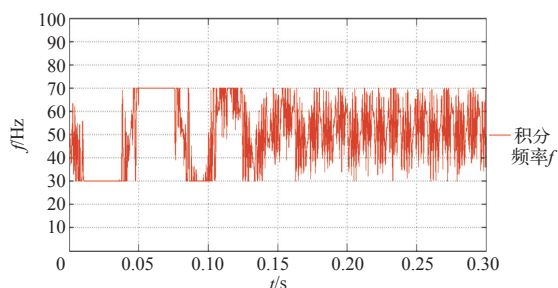


图10 数字积分器前的频率信号

3 算法实验

利用TI的F28069微控制器、市电电压采样电路和上位机等模块构建单相数字逆变锁相硬件平台。根据前述介绍的单相锁相算法设计程序，程序设计参数为：采样频率 $f_s = 20$ kHz；比例系数 $K_p = 5$ ，积分系数 $K_i = 1\ 000$ 。

为了验证不同输入频率，以及各种谐振波注入时，采用该单相数字锁相方案的锁相情况，设计两部分实验。

(1) 不同频率市电的锁相测试

设置实验市电频率为40 Hz、50 Hz和60 Hz，利用上位机监控软件采集锁相过程数据（实线为电网电压波形、虚线为锁相结果波形）。锁相结果如图11~图13所示。

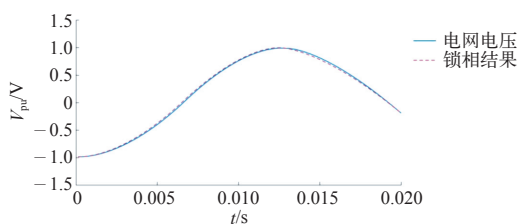


图11 40 Hz市电锁相结果

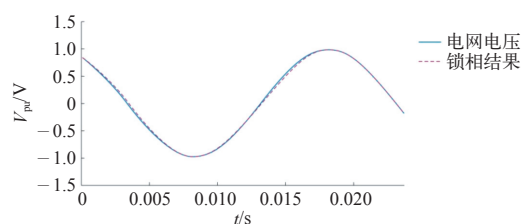


图12 50 Hz市电锁相结果

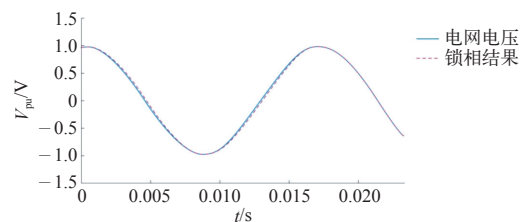


图13 60 Hz市电锁相结果

上述实验说明，在不同频率条件下，本文的锁相算法有效，市电频率计算正常。

(2) 多次谐波注入市电的锁相测试

将奇次谐波（3、5、7、9和11次谐波各10%）注入市电时，实验结果如图14所示。

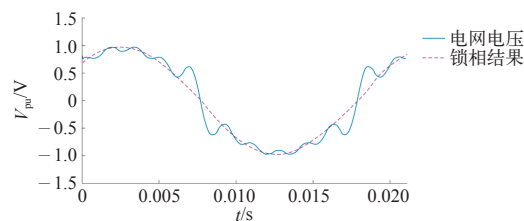


图14 奇次谐波注入市电时的锁相结果

将偶次谐波（2、4、6、8和10次谐波各10%）注入市电时，实验结果如图15所示。

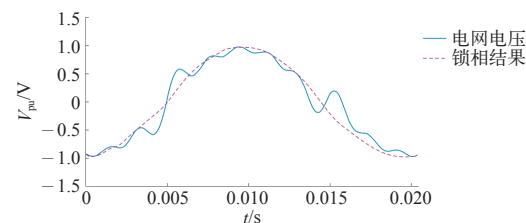


图15 偶次谐波注入市电时的锁相结果

将高次谐波（39、40次谐波各10%）注入市电时，实验结果如图16所示。

上述实验说明，在多次谐波注入市电的条件下，本文的锁相算法有效，市电频率计算正常。

（下转第61页）

准中传输时间要求的同时,传输量得到了进一步的提升。

参考文献

- [1] 张东霞,姚良忠,马文媛.中外智能电网发展战略[J].中国电机工程学报,2013,33(31):1-15.
- [2] 林彦明,张树彬.智能电网通信技术研究[J].应用能源技术,2011(6):43-47.
- [3] 舒印彪.加快电网互联互通,推动能源转型发展[J].中国经贸导刊,2016(34):54-56.
- [4] 江辉.智能配电网在电力营销中应用的研究[J].低碳世界,2016(9):36-37.
- [5] 叶永春.提高配电网分布式能源接纳能力的储

能系统优化配置技术研究[J].企业技术开发,2017,36(12):56-57,75.

- [6] 俞弦,施健,唐云善,等.智能电网通信管理系统建设研究[J].电力系统通信,2011,32(5):101-105.
- [7] 木树娟,黄铭,余江,等.智能电网通信标准分析及关键技术探讨[J].电力系统通信,2011,32(7):76-80.
- [8] 毕艳冰.面向智能电网的通信中间件的关键技术研究[D].济南:山东大学,2013.
- [9] IEC 61850 Communication networks and systems for power utility automation [S].

(收稿日期:2018-02-25) **EA**

(上接第51页)

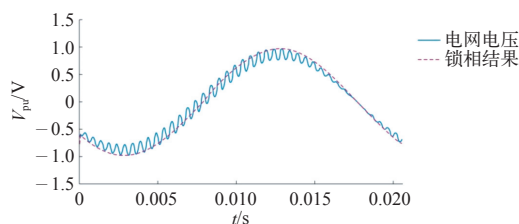


图16 高次谐波注入市电时的锁相结果

4 结束语

本文提出一种新型单相逆变电源的数字锁相方法,该方法通过构造单相市电电压矢量,采用PI控制器控制单相正弦矢量鉴相器快速收敛在稳态值附近,实现锁相功能。

该锁相方法仅采用上一时刻的采样数据,占用内存少,计算简单快速、稳定可靠。搭建Matlab仿真模型和实物样机实验平台,验证了该数字锁相方法可对单相交流电压的相位进行精确跟踪。在市电注入各次谐波及市电频率偏移等工况下,

该方法也有较强的适应性。

参考文献

- [1] 董祖毅,陈国栋.新型单相软件锁相环的研究[J].上海电器技术,2006(4):31-34.
- [2] 赵文才,范声芳,熊健,等.基于DFT算法的单相数字锁相环[J].电力电子技术,2011,45(4):79-81.
- [3] Ciobotaru M, Teodorescu R, Blaabjerg F. A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator [C]. Proceeding of the 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006: 1-6.
- [4] Mojiri M, Karimi-Ghartemani M, Bakhshai A. Estimation of power system frequency using an adaptive notch filter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2470-2477.

(收稿日期:2017-11-30) **EA**