

一种电网电压过零点精确锁相方法的研究

陈增禄, 赵乾坤, 史强强, 孟新新, 颜廷欣

(西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对电网电压过零锁相时存在的零点漂移和相位延迟问题, 提出了一种电网电压过零点精确锁相的方法。通过软件PQ滤波去除ADC采样结果中的零点漂移; 通过人为设定一个过零点锁相提前量, 可提前预见到电网电压的过零点; 然后通过软件自适应补偿算法, 实现电网电压过零点的精确检测。详细阐述了该方法的原理和计算过程, 在无整流器自充电电压暂变补偿装置上的实验结果证实了所提方法的正确性。

关键词: PQ滤波; 零点漂移; 过零锁相; 自适应; 相位延时

Study on precise phase lock techniques used for grid voltage zero-crossing

CHEN Zeng-lu, ZHAO Qian-kun, SHI Qiang-qiang, MENG Xin-xin, YAN Ting-xin

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: To cope with the problem of the voltage-zero drift and the phase delay in zero crossing phase lock, a precise phase lock technique used for grid voltage zero-crossing is proposed. This method removes the zero drift in the ADC sampling result by using PQ filtering; and then sets a zero phase locking schedule artificially, in order to foresee the zero-crossing point of the grid voltage; lastly, through software self-adaptive compensation algorithm, the precise detection of grid voltage zero point can be realized. The design principle and calculation process of this method are introduced. This method is proved to be correct by experiment on the platform of the self-charging voltage sag compensator without rectifier.

Key words: PQ filtering; zero drift; zero-crossing phase locking; self-adaptive; phase delay

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0065-06

0 引言

电网电压或电流相位信息的快速准确获取对各种并网变流器的稳态、动态性能以及安全运行都具有重要的意义。锁相技术被广泛用于工业领域, 如电机控制系统^[1]、电能质量控制系统^[2-4]、分布式发电系统^[5-6]、有源滤波器^[7]以及静态无功补偿器^[8]等电力电子变换系统。如何提高锁相的快速性和准确性是一个重要的研究课题。

基于同步旋转坐标变换的软件锁相环及其改进技术^[1-13]实时性强, 无需进行过零比较, 可以准确获取输入电压基波正序分量频率、幅度和相位等信息, 但是此锁相技术需要复杂的坐标变换和大量的数学运算, 当电网电压出现畸变或不平衡时, 其快速性和准确性会受到影响, 特别是该方法不适用于对单相电网电压进行锁相。过零锁相^[14-16]方法原理简单、易于实现, 仍然是目前工程实践中广泛应用的锁相技术。但是该方法易受电网电压的谐波与噪

声的影响。为抑制电网噪声对过零点检测的影响, 工程上常采用在电压检测前置放大器的输入和输出之间加入RC滤波环节。然而, 对于硬件滤波时间常数RC的选取, 存在一个矛盾。减小RC的值能提高过零检测的精度, 但是电压过零点附近的噪声可能产生多个过零点, 造成过零点检测误差, 进而造成锁相失败; 增大RC的值可以有效滤除电压过零点噪声, 避免多余过零点, 但会造成较大的过零点检测延时, 这两种情况都是不希望看到的。另外, 电压检测前置放大器受温度变化的影响会引起零点漂移, 模拟信号数字化表示的截尾误差等也可能造成直流漂移, 使得对电压过零点的检测产生误差; 而且ADC采样间隔、软件程序执行等因素也会引起过零点检测随机延时, 使得锁相准确性变差。为抑制零点漂移对过零点准确检测的影响, 目前常通过改善硬件电路的性能予以实现^[17], 但是该方式会降低系统的性价比, 并且抑制零漂的效果不佳; 文献[18]采用软硬件结合的方式, 有效抑制了零点漂

移,但是该方法是在硬件去零漂的基础上实现的,系统性价比低,并且软件实现复杂。

为提高过零锁相的准确性和快速性,本文提出了一种电网电压过零点精确锁相方法。该方法原理简单、实现方便,可以快速准确地检测出输入信号过零点,有效抑制零点漂移,适应于电网电压稳定或暂变的场合。并在 20 kVA 无整流器自充电电压暂变补偿装置^[19]实验平台上进行了实验验证。

1 电网电压精确锁相原理分析

本节将详细论述电网电压过零点准确检测与锁相的方法和原理,主要包括软件方式去除直流漂移、硬件滤波去除电网电压噪声及其相位延迟的分析、ADC 采样间隔等对锁相精度的影响,最后,重点分析了软件方法自适应补偿相位延迟的原理。

1.1 PQ 滤波去零漂原理

由于电压检测前置放大器受温度变化的影响会引起零点漂移、SPWM 变换器开关系数的不平衡、ADC 前置放大器的直流漂移、模拟信号数字化表示的截尾误差等都会使得电网电压检测的 ADC 采样结果中存在直流漂移分量。这些直流漂移分量的特点是变化非常缓慢,因此可以用一个大时间常数的惯性数字滤波器将其分离出来。PQ 滤波的物理模型等价于稳态增益恒为 1 的一阶惯性滤波器。只要设定其滤波时间常数足够大,滤波的结果就只剩下被测信号中的直流成分。原理框图如图 1 所示。图中, x_k 表示某相电网电压 ADC 采样后的数字序列, k 为序列号。PQ 滤波的输出 d_k 就是 x_k 中的直流分量。于是从 x_k 中去除 d_k 后就得到无直流分量的电网电压数字序列 y_k 。即有

$$y_k = x_k - d_k, k=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$



图 1 PQ 滤波法去零漂原理框图

Fig. 1 Principle sketch to remove zero-drift by PQ filter

PQ 滤波递推公式为

$$\begin{cases} d_k = pd_{k-1} + qx_k, k = 0, 1, 2, \dots \\ p + q = 1 \\ p = \frac{2^n - 1}{2^n}, n \text{ 为整数} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)可化简为

$$d_k = d_{k-1} + \frac{1}{2^n}(x_k - d_{k-1}) \quad (3)$$

可以证明,式(3)是一个稳态增益为 1 的一阶惯性滤波,其滤波时间常数为

$$T_f = (2^n - 1)T_s \quad (4)$$

其中, T_s 为 ADC 采样周期。

对比式(2)和式(3)可以看出, PQ 滤波的计算量非常小,每个采样周期只需做一次加法运算和一次 n 位的右移,这就是为什么式(2)中的 p 要如此取值的原因。由式(4)可知,只要选择适当的 n ,就可以得到足够大的滤波时间常数 T_f 。

1.2 硬件滤波及其相位延迟的分析

电网电压锁相一般采用电压过零点检测的方法,工程上在电压检测前置放大器的输入和输出之间往往会人为地加入一个 RC 滤波环节。这样一来,ADC 采样结果相对于实际电压信号而言就存在一个相位滞后。

假设电压检测硬件电路滤波时间常数为 RC ,则由滤波环节引起的相位滞后角 θ 为

$$\theta = \arctan \omega_b RC \quad (5)$$

其中, ω_b 为电网电压角频率。

由于一般都有

$$0 < RC \ll \frac{2\pi}{\omega_b} = T_b \quad (6)$$

其中, T_b 为电网电压周期。

式(5)可近似表示为

$$\theta = \arctan \omega_b RC \approx \omega_b RC \quad (7)$$

则由电压检测硬件电路滤波环节引起的滞后时间为

$$t_1 = \frac{\theta}{\omega_b} \approx \frac{\omega_b RC}{\omega_b} = RC \quad (8)$$

由式(8)可知,当硬件滤波时间常数 RC 远小于电网电压周期值 T_b 时,电压检测硬件电路对过零点检测造成的延时 t_1 近似等于电压检测硬件滤波时间常数 RC 。应该注意到,在满足式(6)的条件下,式(8)与 ω_b 无关,因此本文方法适用于频率缓慢变化的场合。

1.3 ADC 采样间隔和软件程序运算对锁相精度的影响

根据过零点检测的原理,当检测到第 k 拍 ADC 采样结果 $y(k) \geq 0$, 而第 $k-1$ 拍的采样结果 $y(k-1) < 0$ 时,则认为检测到过零点。然而,这个判断过程还需要一个执行时间 t_2 , 才能确认出现了过零点,如图 2 所示。图中 T_s 表示 ADC 采样周期, M 点为电压实际过零点, M_1 点为 $y(k)$ 的采样时刻, M_2 点为程序判断到过零点的时刻。由图 2 可知, $y(k)$ 的采样

时刻 M_1 相对于实际过零点 M 而言, 随机地滞后一个时间 t_b 。具体程序中, 由于过零点检测和锁相往往设置在中断子程序中, 如果系统程序中设置的中断子程序不止一个, 且优先级高于锁相中断程序的优先级, 那么 t_2 将是一个可变的未知量。随机延时 t_b 和 t_2 的存在同样会引起过零点检测的相位滞后。

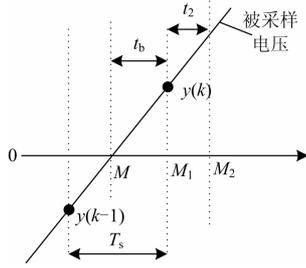


图2 采样间隔和程序执行对锁相精度的影响

Fig. 2 Phase locking error caused by sample and program execution

由图2, 根据相似三角形原理可求得 t_b 为

$$0 \leq t_b = \frac{y(k)}{y(k) - y(k-1)} T_s < T_s \quad (9)$$

由式(9)可知, ADC 采样间隔引起的过零点检测随机延时 t_b 的极限值为 T_s 。

1.4 电网电压精确锁相原理

本文提出的电网电压精确锁相方法的原理是①选择足够大的 PQ 滤波时间常数 T_f , 用于有效去除直流漂移, 同时又不影响电网电压的实时波形; ②选取较大的硬件滤波时间常数 RC , 保证能较好地滤除电网电压的随机噪声; ③采用软件算法精确补偿硬件滤波延时 t_1 、ADC 采样间隔引起的随机延时 t_b 以及软件程序执行时间引起的随机延时 t_2 。下面以正向过零点为例, 分析采用软件算法自适应精确补偿上述相位延迟的原理。

令电网电压的表达式为

$$u_s(t) = U_m \sin \omega_b t \quad (10)$$

式中, U_m 表示电网峰值电压。

由 1.2 节分析可知, 电网电压经过硬件滤波后送给 ADC 采样的电压表达式为

$$u_{ADC}(t) = U_{m1} \sin \omega_b (t - t_1) \quad (11)$$

式中, U_{m1} 表示 ADC 采样电压的峰值。由式(6)的 $\omega_b RC \ll 1$, 可知 $U_{m1} \approx U_m$, 则式(11)可近似表示为

$$u_{ADC}(t) \approx U_m \sin \omega_b (t - t_1) \quad (12)$$

取一个过零点检测提前量 ΔT , 使得程序可以在电网电压实际过零点以前预见到过零点, 如图3所示。图中, 实线表示实际电网电压 u_s , 虚线表示硬

件滤波后送给 ADC 采样的电压 u_{ADC} 。令

$$\Delta T = t_1 + t_2 + T_s + t' \quad (13)$$

其中: t_1 为硬件滤波造成的过零点检测延时; t_2 为过零点判断及锁相程序执行造成的过零点检测随机延时; T_s 表示采样间隔引起的过零点检测随机延时 t_b 的极限值; t' 表示人为设定的一个安全裕量。

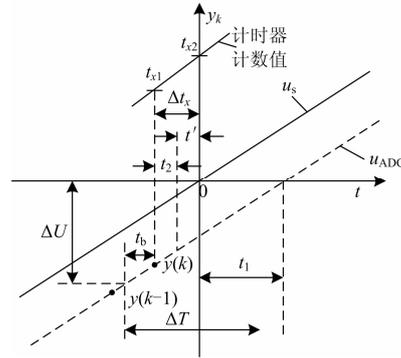


图3 过零点精确锁相示意图

Fig. 3 Schematic of precise zero-cross phase locking

由于一般总有 $\Delta T \ll T_b$, 在过零点附近, u_{ADC} 上与 ΔT 对应的电压为

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_m \sin(-\omega_b \cdot \Delta T) \approx \\ &-U_m \omega_b \Delta T = -U_m \frac{2\pi}{T_b} \Delta T \end{aligned} \quad (14)$$

以“交越 ΔU ”为过零点检测判断依据, 当第 k 拍的采样结果 $y(k)$, 第 $k-1$ 拍的采样结果 $y(k-1)$ 满足式(15)时, 程序即可在实际电网电压到达过零点之前预见到过零点。

$$[y(k) - \Delta U][y(k-1) - \Delta U] \leq 0 \quad (15)$$

此时, 式(9)表示为

$$t_b = \frac{y(k) - \Delta U}{y(k) - y(k-1)} T_s \quad (16)$$

由式(14)可见, 当 ΔT 一定时, 过零点检测判据 ΔU 只与电网峰值电压 U_m 和电网电压周期 T_b 有关, 因此只需根据 U_m 和 T_b 实时更新 ΔU 即可。理论上本文方法同样适用于电网电压幅值或相位发生突变的情况, 并且过渡过程最多为一个周期。

设定一个定时周期大于工频周期 T_b 的时钟定时器 T_x , 提供一个客观时钟。在每个 ADC 采样时刻捕获时钟定时器的时间值, 记为 t_{xk} 。记当前时刻的 t_{xk} 为 t_{x1} , t_{x1} 为精确确定电网电压 u_s 的过零点提供时间基准。然后根据式(16)可计算得到 t_b 。由图3可知, u_s 的过零点将会发生在 t_{x1} 之后的 Δt_x 时刻。

且有

$$\Delta t_x = \Delta T - t_1 - t_b \quad (17)$$

进而可求得电网电压 u_s 正向过零点发生时 T_x 的时间值为

$$t_{x2} = t_{x1} + \Delta t_x \quad (18)$$

将 t_{x2} 写入定时器比较寄存器, 当计数器的值等于 t_{x2} 时, 定时器与比较寄存器匹配, 得到电网电压 u_s 精确过零点时刻。如果此时将正弦表指针归零, 即可实现要控制的输出信号与实际电网电压保持严格的相位同步。 t_{x1} , t_{x2} 与 Δt_x 之间的关系也表示在图 3 中。

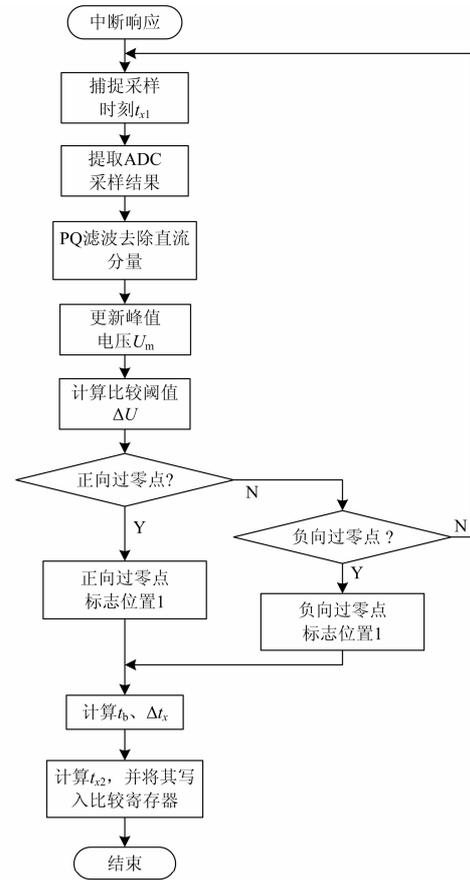
负向过零点锁相与此类似, 不同的仅仅是式(14)计算出的 ΔU 取正值, 这里不再赘述。

2 软件实现

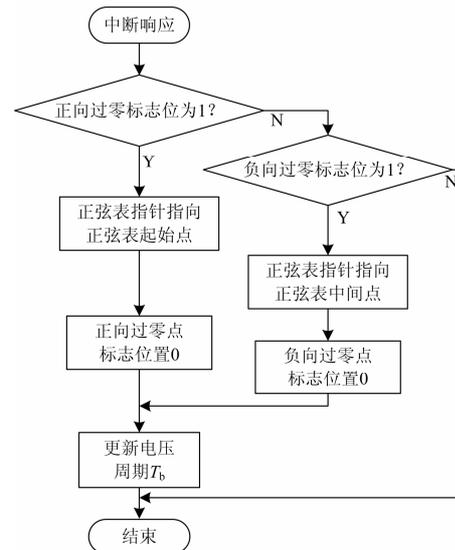
作为电网电压过零点准确锁相的实现环节, 数字化程序应包括如下几个功能: ①PQ 滤波去除直流漂移; ②实时更新电网峰值电压 U_m 和周期 T_b , 并计算下一个半周期的比较阈值 ΔU ; ③捕捉 t_{x1} , 按式(15)判断是否与 ΔU 交越, 并计算 t_{x2} 。具体程序中, 要控制的 ARM 输出基准是通过查找标准正弦表完成的, 即检测到电网电压过零点时, 对正弦表指针进行操作, 使 ARM 的输出基准也正好过零, 实现相位锁定。为此, 程序中设置了正、负向过零点标志位和正弦表指针。其软件设计流程图如图 4 所示, 其中图 4(a)表示捕获中断程序流程图, 主要完成软件 PQ 滤波去除直流偏移、电网峰值电压 U_m 和比较阈值 ΔU 的实时更新、电网电压过零点的精确检测, 并将电压过零点时刻 t_{x2} 赋给定时器比较寄存器; 图 4(b)表示定时器中断程序流程图, 当定时器与其比较寄存器的值匹配时, 定时器开中断, 主要实现电网电压正、负过零点的锁相操作以及电压周期 T_b 的实时更新。

3 实验结果

在基于 STM32F103VBT6 的无整流器自充电串联型电压暂变补偿装置^[19]实验平台上, 对本文提出的方法进行了实验验证。其中, $n=16$, $p=0.99985$, PQ 滤波时间常数 $T_f=3.27675$ s, 硬件滤波延时 $t_1=300$ μ s, ADC 采样间隔最大延时 $T_s=50$ μ s, 安全裕量 $t'=200$ μ s, 过零点检测提前量 $\Delta T=600$ μ s。得到实验结果如图 5、图 6 所示。



(a) 捕获中断程序流程图



(b) 定时器中断程序流程图

图 4 过零点精确锁相软件流程图

Fig. 4 Flow chart of precise zero-crossing phase lock software

图 5 为电网电压正常时的实验结果。其中, 图 5(a)表示电网电压稳态锁相波形, 横轴表示时间(5

ms/格); 纵轴表示幅值, 正弦波表示电网电压波形(100 V/格), 矩形波表示过零锁相标志信号(1 V/格)。图 5(b)是对图 5(a)正向过零点处的局部放大, 横轴表示时间(500 μ s/格)。由图 5 可见, 本文方法可以实现电网电压过零点准确锁相。

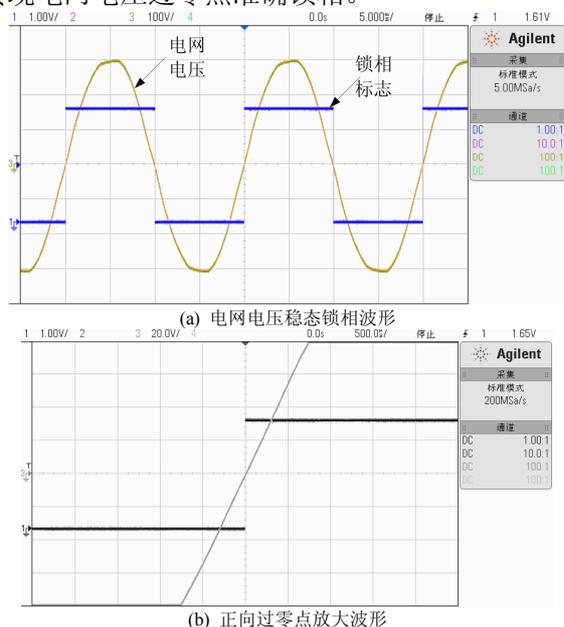


图 5 电网电压稳态时的实验结果

Fig. 5 Experimental results of grid voltage steady state

图 6 为电网电压有效值由 220 V 暂降到 136 V 时, 采用本文方法的锁相结果。其中, 正弦波表示

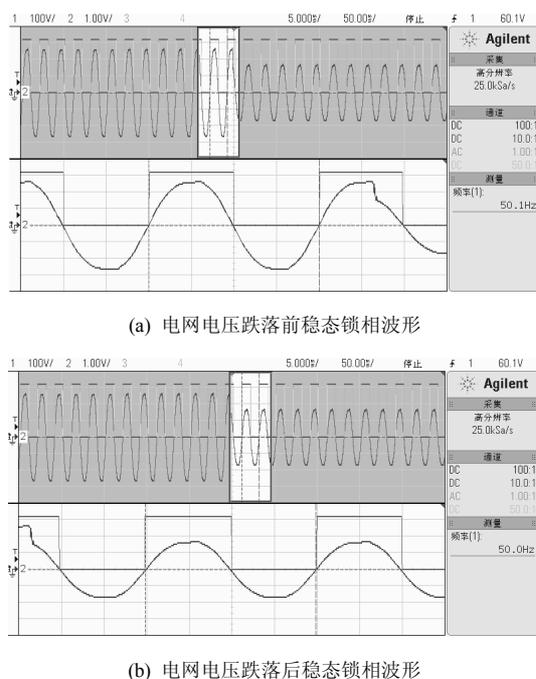


图 6 电网电压跌落时的实验结果

Fig. 6 Experimental results when grid voltage sags

电网电压, 纵轴表示幅值(100 V/格); 矩形波表示过零点锁相标志信号, 纵轴表示幅值(1 V/格)。每幅图的上半部分相同, 横轴表示时间(50 ms/格); 下半部分是电压幅值暂降时, 对上半部分不同时刻的局部放大, 横轴表示时间(5 ms/格)。其中图 6(a)表示电网电压暂降前的稳态锁相波形, 图 6(b)表示电网电压暂降后第一个周期的稳态锁相波形。

由图 6 可见当电网电压暂变时刻发生在峰值电压右侧时, 由于比较阈值 ΔU 是按暂变前峰值电压计算的, 因此可能会使暂变后第一个过零点锁相不准, 但是第二个及以后的过零点都能实现准确锁相。说明本文方法适用于电网电压稳定或发生暂变的场合, 并且当电压暂变时该方法能在一个周期内实现准确锁相。

4 结论

本文提出了一种电网电压过零点精确锁相新方法。使用大时间常数软件 PQ 滤波提取并消除硬件和软件产生的直流漂移; 设置一个软件判断提前量以抵消硬件滤波引起的过零点延时; 可以精确计算采样间隔产生的随机误差 t_b ; 最后, 利用嵌入式微控制器的捕获和比较功能实现电网电压过零点的精确锁相。

该方法允许设置较大的硬件滤波时间常数, 有利于提高过零点锁相的抗扰性能; 锁相精度不受程序执行时间随机变化的影响; 对电网电压幅值和周期的变化有快速的自适应能力。当电网电压发生阶跃变化时, 该方法能在一个周期内实现精确锁相。实验结果验证了上述结论。

参考文献

- [1] 高金文, 温旭辉, 陈静薇, 等. 新型锁相环定子磁链观测器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 41-47.
GAO Jin-wen, WEN Xu-hui, CHEN Jing-wei, et al. Novel motor stator flux observer based on PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 41-47.
- [2] 杨勇, 阮毅, 汤燕燕, 等. 基于锁相环和虚拟电网磁链的三相并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 109-114.
YANG Yong, RUAN Yi, TANG Yan-yan, et al. Three-phase grid-connected inverters based on PLL and virtual grid flux[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 109-114.
- [3] FILHO R M S, SEIXAS P F, CORTIZO P C, et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2923-2932.

- [4] 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, 28(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, 28(8): 42-45.
- [5] 赵耀, 赵庚申, 赵星宇, 等. 分布式电源中 Z 源逆变器锁相方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 46-50.
ZHAO Yao, ZHAO Geng-shen, ZHAO Xing-yu, et al. Research on phase locking method of Z-source inverter used in distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 46-50.
- [6] 阚加荣, 罗运虎, 谢少军, 等. 基于下垂特性锁相环的反孤岛性能分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 165-170.
KAN Jia-rong, LUO Yun-hu, XIE Shao-jun, et al. Analysis with anti-islanding performance of grid-connected inverters based on drooped PLL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 165-170.
- [7] 李红雨. 独立小电网有源电力滤波器的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [8] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 24-29.
JI Fei-feng, ZHOU Li-dan, YAO Gang, et al. Static var compensator based on the method of synchronous symmetrical component[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 24-29.
- [9] AWAD H, SVENSSON J, BOLLEN M J. Tuning software phase-locked loop for series-connected converters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 300-308.
- [10] 孙浩, 袁慧梅. 基于 FPGA 的三相锁相环的优化设计方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 98-101.
SUN Hao, YUAN Hui-mei. Optimized implementation scheme of three phase phase-locked loop based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 98-101.
- [11] 洪小圆, 吕征宇. 基于同步参考坐标系的三相数字锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 203-210.
HONG Xiao-yuan, Lü Zheng-yu. Three-phase digital phase-locked loop based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 203-210.
- [12] 张治俊, 李辉, 张煦, 等. 基于单 / 双同步坐标系的软件锁相环建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 138-144.
ZHANG Zhi-jun, LI Hui, ZHANG Xu, et al. Simulation and modeling of software phase-locked loop based on single/double synchronous coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 138-144.
- [13] 王颢雄, 马伟明, 肖飞, 等. 双 dq 变换软件锁相环的数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 237-241.
WANG Hao-xiong, MA Wei-ming, XIAO Fei, et al. Study of model of software phase locked-loop based on dual-dq synchronous transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 237-241.
- [14] NAIDU S R, MASCARENHAS A W, FEMANDES 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.
- [15] 刘海春, 徐立智, 谢少军. 一种新的过零锁相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 147-150.
LIU Hai-chun, XU Li-zhi, XIE Shao-jun. A new phase locking method with zero crossing[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 147-150.
- [16] 张瑜, 陈新. 基于 DSP2812 的软件锁相[J]. 电力电子技术, 2008, 42(2): 75-77.
ZHANG Yu, CHEN Xin. Software phase locked loop based on DSP2812[J]. Power Electronics, 2008, 42(2): 75-77.
- [17] 高美蓉. 如何抑制直接耦合放大电路中零点漂移[J]. 现代电力技术, 2010, 12: 13-15.
- [18] 张春飞, 罗家融. 软件去除零点漂移方法的讨论[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(7): 684-686.
ZHANG Chun-fei, LUO Jia-rong. Discussion on the method of eliminating zero-offset based on software[J]. Computer Measurement & Control, 2004, 12(7): 684-686.
- [19] 陈增禄, 田苗苗. 串联型电压暂变补偿新拓扑及其控制方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 144-148.
CHEN Zeng-lu, TIAN Miao-miao. A novel simplified voltage sag compensator topology and its control strategies[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 144-148.

收稿日期: 2013-06-17

作者简介:

陈增禄(1957-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电能质量控制、馈能式电子负载的研究、电机控制新方法的研究及太阳能发电系统并网研究等;

赵乾坤(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为串联型电压暂变补偿装置新拓扑及其控制策略的研究。E-mail: wenshuo2010@163.com