

适用于电网不平衡时的广义积分器锁相环设计

胡应占, 郭素娜

(河南工业职业技术学院电气工程系, 河南 南阳 473000)

摘要: 为准确快速检测出电网电压的幅值、相位和频率, 在分析对称分量法及单同步坐标系锁相环基本原理的基础上, 提出了广义积分器锁相环的设计方法。这种方法在 $\alpha\beta$ 坐标系下对电网电压进行正、负分序, 进而锁定正序电压的相位和频率。并且使用Matlab/Simulink环境分别对单同步坐标系锁相环和基于广义积分器锁相环进行仿真研究, 仿真结果表明广义积分器锁相环在电网不平衡时能够准确提取电网信号的幅值、相位和频率, 频率自适应性良好且对低次谐波有一定的抑制作用。

关键词: 变流器; 电网系统; 锁相环; 对称分量法; 广义积分器

Design of generalized integrator phase locked loop for unbalanced grid

HU Ying-zhan, GUO Su-na

(Department of Electrical Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China)

Abstract: In order to detect the amplitude, phase and frequency of the grid voltage quickly and accurately, this paper analyzes the method of symmetrical components and principle of single synchronous reference frame phase locked loop. A design method of the generalized integrator phase locked loop is presented, of which the positive and negative components are distinguished in $\alpha\beta$ coordinate system, and the phase and frequency of positive sequence voltage are locked. And it takes use of Matlab/Simulink to carry on the research of single synchronous reference frame phase-locked loop and generalized integrator phase locked loop. Simulation results show that the generalized integrator phase locked loop can get amplitude, phase and frequency of the grid voltage accurately when the grid is unbalanced, and the frequency has good adaptiveness and has a certain inhibiting effect on low-order harmonic.

Key words: converter; power system; phase locked loop (PLL); symmetrical component method; generalized integrator

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0148-07

0 引言

锁相环是保持输入信号和输出信号具有同步电位的控制电路。法国工程师 De-Bellesciz 于 1932 年, 首次提出了“相关通信”, 实现了同步检波, 这是在世界范围内对锁相环研究的最早论述^[1]; 上世纪 40 年代, 锁相环技术 (PLL) 被应用于电视同步扫描接收装置中; 到 20 世纪 50 年代, 锁相环技术被应用于太空技术领域^[2]; 1965 年世界上第一块纯模拟的锁相环集成芯片诞生; 1970 年出现了第一个数字与模拟混合的锁相环集成芯片, 其中鉴相器为数字电路, 其余部分则为模拟电路^[3]; 20 世纪 70 年代后期, 出现了全数字锁相环集成芯片, 它不包含任何无源器件, 完全由数字电路组成; 自此之后, 锁相环技术迅速发展成为电子通信、航空航天、工业制造、电子勘探、风力/水力发电以及消费电子等领域不可或缺的关键技术^[4-5]。如今, 锁相环技术已逐步成熟, 其应用领域也更为广泛, 但人们对锁相

环技术的研究从来没有停滞过。

电网电压的幅值、相位和频率是对电网侧变流器进行控制的主要信息, 由此在电网系统中能够快速准确检测出电网电压的幅值、相位和频率的系统是至关重要的^[6]。锁相环能够跟踪、锁定交流信号的相位, 而且可根据需要提供相关信号的幅值及频率信息, 其性能能够直接影响到网侧变流器的控制。

在实际应用中, 电网常处于不平衡状态, 这样就使得我们对锁相环的控制有更高的技术要求。为了保证能对网侧变流器的准确控制, 本文在分析对称分量法及单同步坐标系锁相环基本原理的基础上, 提出了适用于电网不平衡时的广义积分器锁相环的设计方法: 在 (α, β) 坐标系下使用两个广义积分器作为 α 分量和 β 分量的正交信号发生器, 通过对广义积分器内部 k 值的选取, 可以使其具有一定的滤波性能, 然后通过正负序计算单元, 实现对电网电压的正序与负序分量的提取, 最后再由单同步坐标系锁相环锁定正序电网电压的相位和频率, 同时, 锁

相环输出频率作为广义积分器的谐振频率, 实现频率自适应^[7]。

1 对称分量法基本原理

对称分量法是将不平衡的三相电量分解为一下三组对称的分量: (1) 正序分量, 正序的三相分量大小相等, 彼此相位相差 120° , 相序同于系统正常运行时; (2) 负序分量, 负序的三相分量大小相等, 彼此相位相差 120° , 相序与正序相反; (3) 零序分量, 零序的三相分量大小相等, 相位相同。如图 1 所示, 下标 a、b、c 分别表示三相电量, 上标 p,n,o 分别表示正序、负序和零序分量^[8]。

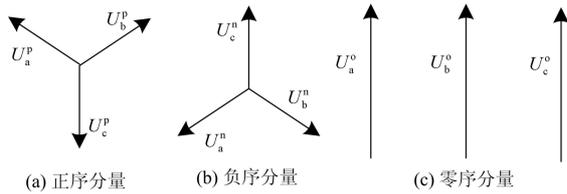


图 1 对称分量中的向量关系

Fig. 1 Vector relationship of symmetrical components

图1中a、b、c三相的正、负、零序分量之间的关系为

$$\begin{cases} U_b^p = \sigma^2 U_a^p; U_c^p = \sigma U_a^p \\ U_b^n = \sigma U_a^n; U_c^n = \sigma^2 U_a^n \\ U_b^o = U_a^o; U_c^o = U_a^o \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中

$$\sigma = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$\begin{cases} \sigma^3 = 1 \\ 1 + \sigma + \sigma^2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

则 a、b、c 三相的向量与对称分量之间的关系如下

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sigma^2 & \sigma & 1 \\ \sigma & \sigma^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a^p \\ U_a^n \\ U_a^o \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \sigma^2 & \sigma & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b^p \\ U_b^n \\ U_b^o \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \sigma & 1 \\ \sigma & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_c^p \\ U_c^n \\ U_c^o \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

对式(1)~式(3)将式(4)进行重新组合并结合式化简得a、b、c三相正序分量、负序分量的具体表达式如下

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_a^p \\ U_b^p \\ U_c^p \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} U_a - \frac{1}{2}(U_b + U_c) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(U_b - U_c) \\ -3(U_a^p + U_c^p) \\ U_c - \frac{1}{2}(U_a + U_b) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(U_a - U_b) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_a^n \\ U_b^n \\ U_c^n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} U_a - \frac{1}{2}(U_b + U_c) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(U_c - U_b) \\ -3(U_a^n + U_c^n) \\ U_c - \frac{1}{2}(U_a + U_b) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(U_b - U_a) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

2 单同步坐标系锁相环设计

单同步坐标系锁相环通过在同步旋转坐标系下对电网电压的同步锁定来实现锁相环的控制。

2.1 单同步坐标系锁相环的工作原理

设电网电压处于平衡状态, 则三相分量可表示为

$$\begin{cases} U_a = U \sin(\omega t) \\ U_b = U \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c = U \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: U 表示三相电压幅值; ω 为三相电压角频率。式(6)经坐标变换, 可得 (α, β) 坐标系下的电网电压为

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

以d轴定向将式(7)变换到(d,q)坐标系, 如下

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta_0) \\ \sin(\omega t - \theta_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, θ_0 为锁相环输出的角度^[9]。

分析式(8)知, 当 $\omega t \neq \theta_0$ 时, 此时电压相位处于未锁定状态, U_d 和 U_q 都是交流分量; 而当 $\omega t = \theta_0$ 时, 电压相位处于锁定状态, U_d 和 U_q 均为直流分量, 此时, $U_d = U$, $U_q = 0$, 锁相环输出电压与电网电压重合, 锁相环准确锁相。因此, 在锁相环中进行适当的控制, 使 $U_q = 0$, 就可实现锁相。

单同步坐标系锁相环的架构原理图如图2所

示。首先将(a,b,c)坐标系中的正弦电压转换成(α,β)坐标系下的正弦量,再以d轴定向把(α,β)坐标系下的正弦量转换成(d,q)坐标系下的直流量;然后对 U_q 进行PI调节,使 U_q 的幅值趋于0,从而实现锁相功能;最后将PI调节器的输出与设定角频率叠加,就可得到锁相环的输出频率。

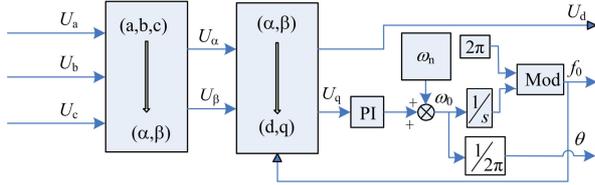


图2 单同步坐标系锁相环的结构图
Fig. 2 Block diagram of the SRF-PLL

上述介绍都是建立在电网电压是平衡状态时的情况,若电网电压不平衡,则三相分量可以表示为

$$\begin{cases} U_a = U^p \sin(\omega t) - U^n \sin(\omega t - \varphi^n) + U^o \sin(\omega t + \varphi^o) \\ U_b = U^p \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - U^n \sin(\omega t - \varphi^n + \frac{2\pi}{3}) + U^o \sin(\omega t + \varphi^o) \\ U_c = U^p \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - U^n \sin(\omega t - \varphi^n - \frac{2\pi}{3}) + U^o \sin(\omega t + \varphi^o) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: U^p 、 U^n 、 U^o 分别表示正序电压分量、负序电压分量和零序电压分量; φ^n 和 φ^o 分别表示负序电压分量和零序电压分量的初始相角^[10]。

经坐标变换,可将(a,b,c)坐标系下的电网电压转换成(α,β)坐标系下的表达形式,其表达式为

$$\begin{cases} U_\alpha = U^p \cos(\omega t) + U^n \cos(\omega t - \varphi^n) \\ U_\beta = U^p \sin(\omega t) + U^n \sin(-\omega t + \varphi^n) \end{cases} \quad (10)$$

进一步求得三相电电压的幅值和相位为

$$\begin{cases} |U| = \sqrt{(U^p)^2 + (U^n)^2 + 2U^p U^n \cos(-2\omega t + \varphi^n)} \\ \theta = \omega t + \arctan\left(\frac{U^n \sin(-2\omega t + \varphi^n)}{U^p + U^n \sin(-2\omega t + \varphi^n)}\right) \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可看出,当电网电压不平衡时,电压的频率和幅值都不恒定,而且相位和幅值都含有谐波,所以,单同步坐标系锁相环不能准确检测出电网电压相位和幅值^[11]。

2.2 单同步坐标系锁相环的仿真研究

在Matlab/Simulink环境下对单同步坐标系锁相环进行仿真研究。

(1) 电网电压平衡

三相电网电压的幅值均为 $U=1.0$ pu, 相位互差 120° , 频率 $f=50$ Hz, a相电压初始相位为 0° , 仿真波形如图3所示。仿真结果表明,电网电压平衡条件下,

单同步坐标系锁相环具有不错的性能,能准确获取电网电压的相位和频率。

(2) 电网电压不平衡

三相电网电压的幅值分别为: $U_a=0.2$ pu, $U_b=1.0$ pu, $U_c=0.8$ pu, 相位互差 120° , 频率 $f=50$ Hz, a相电压初始相位为 0° , 仿真波形如图4所示。仿真结果表明,单同步坐标系锁相环不适用于电网电压不平衡的情况。

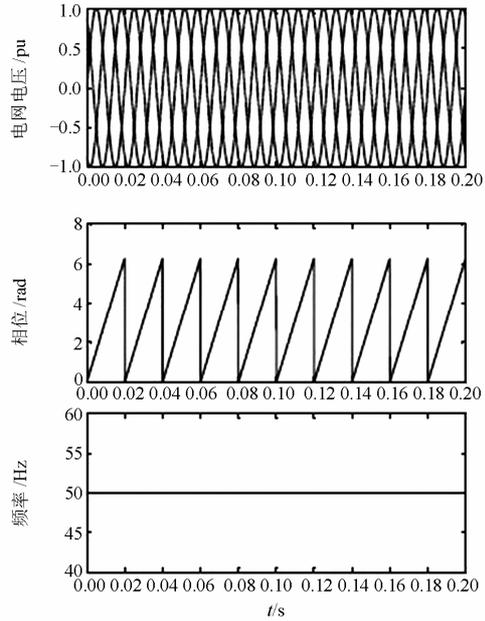


图3 单同步坐标系锁相环的仿真结果 (1)
Fig. 3 Simulation results of the SRF-PLL (1)

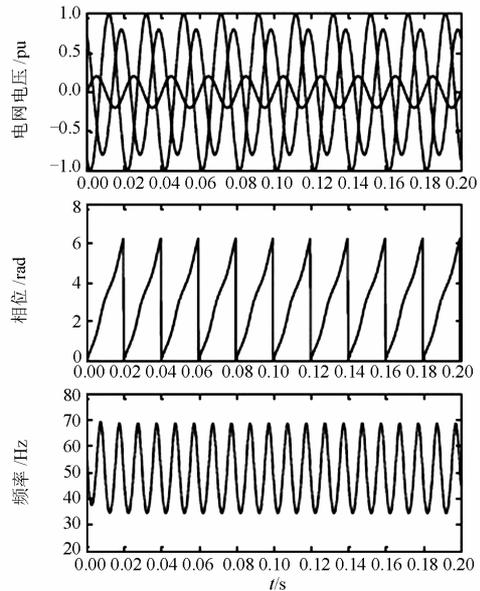


图4 单同步坐标系锁相环的仿真结果 (2)
Fig. 4 Simulation results of the SRF-PLL (2)

3 广义积分器锁相环设计

经上述分析可知, 当电网平衡时, 单同步坐标系锁相环能够准确快速地检测出电网电压的幅值、相位和频率。然而, 在实际应用中, 由于电网受到负载、故障等原因的影响, 电网电压往往处于不平衡状态^[12-13]。在研究完电网平衡时锁相环的控制之后, 有必要对锁相环技术的难点——电网不平衡时锁相环的控制进行研究。

3.1 不平衡电压正序、负序分量的检测

利用对称分量法, 由文献[13]可将不平衡电网电压 U_{abc} 的正序分量 U_{abc}^p 表示为

$$U_{abc}^p = \mathbf{D}U_{abc} \quad (12)$$

式(12)中

$$\mathbf{D} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \sigma & \sigma^2 \\ \sigma^2 & 1 & \sigma \\ \sigma & \sigma^2 & 1 \end{pmatrix}$$

式(12)经过(a,b,c)到(α,β)的变换, 可得到在(α,β)系下的电网电压为

$$U_{\alpha\beta} = \mathbf{D}_{(abc)to(\alpha\beta)} U_{abc}$$

其中

$$\mathbf{D}_{(abc)to(\alpha\beta)} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

由上所述可容易得到在(α,β)坐标系下三相电压的正序分量 $U_{\alpha\beta}^p$ 和负序分量 $U_{\alpha\beta}^n$ 为

$$\begin{aligned} U_{\alpha\beta}^p &= \mathbf{D}_{(abc)to(\alpha\beta)} U_{abc}^p = \mathbf{D}_{(abc)to(\alpha\beta)} \mathbf{D}U_{abc} = \\ & \mathbf{D}_{(abc)to(\alpha\beta)} \mathbf{D} \mathbf{D}_{(abc)to(\alpha\beta)}^{-1} U_{\alpha\beta} = \\ & \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{pmatrix} U_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (13)$$

$$U_{\alpha\beta}^n = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{pmatrix} U_{\alpha\beta} \quad (14)$$

其中, $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ 表示的是将原电压信号偏相位滞后 90° , 也就是说在(α,β)坐标系下, 要得到电网电压的正序和负序分量, 就必须对原电压信号进行 90° 的相位偏移, 得到两相正交的电压。

目前有很多方法产生两相正交信号^[14], 本文采用基于广义积分器的正交信号发生器 (Orthogonal signal generator, OSG), 图5为其结构图。

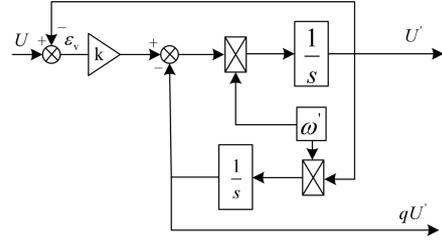


图5 基于广义积分器的正交信号发生器

Fig. 5 Block diagram of the OSG

图5所示系统的传递函数为

$$\begin{cases} D(s) = \frac{U'(s)}{U(s)} = \frac{k\omega' s}{\omega'^2 + k\omega' s + s^2} \\ Q(s) = \frac{qU'(s)}{U(s)} = \frac{k\omega'}{\omega'^2 + k\omega' s + s^2} \end{cases} \quad (15)$$

ω' 是 OSG 产生正交信号的谐振频率, k 是 OSG 系统的阻尼系数, 它直接影响系统的带宽, k 的选择, 要综合考虑系统的响应速度和系统的滤波效果^[15]。如果 U 是频率为 ω 的正弦信号, 则可将其写成矢量形式。由式(15)计算 OSG 系统的幅相特性如下

$$\begin{cases} U' = DU \\ D^2 = \frac{(k\omega'\omega)^2}{(k\omega'\omega)^2 + (\omega'^2 - \omega^2)^2} \\ \angle D = \tan^{-1} \left(\frac{\omega'^2 - \omega^2}{k\omega'\omega} \right) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} qU' = QU \\ Q^2 = \frac{\omega'^2}{\omega^2} D^2 \\ \angle Q = \angle D - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (17)$$

当 $\omega' = \omega$ 时, 分析式(16)、式(17)可知 U' 与 U 有相同的相位和幅值, qU' 总是比 U' 滞后 90° , 且与 k 、 ω' 、 ω 的取值无关, 此时系统处于稳定状态, OSG系统产生的两相信号 U' 和 qU' 是正交的。所以, 在(α, β)坐标系下, 将电网电压 U_α, U_β 分别经 OSG 以实现 90° 相角偏移, 然后经公式(13)与式(14)的计算, 便得到电网电压的正序与负序分量, 如图6所示。

3.2 广义积分器锁相环的工作原理

不平衡状态电压的正序分量和负序分量可以用图6所示的方法有效的提取, 而且算法简便, 但是当电网电压的频率与 OSG 谐振频率不相等($\omega \neq \omega'$)

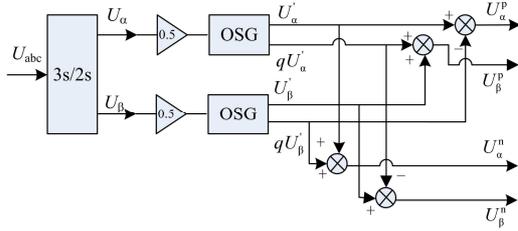


图6 基于OSG的正负序分量计算

Fig. 6 Positive and negative sequence component calculation based on OSG

的时候，OSG系统虽然仍能产生两相正交信号，但频率和幅值都会发生一定程度的偏差，而这种误差又会在之后的正、负序分量的计算单元进一步被放大。由对称分量法可知，提取出的电网电压正、负序分量均是对称的，可以在如图6所示系统的正序电压后级接单同步坐标系锁相环，锁相环输出的频率动态修正OSG的谐振频率，实现频率自适应功能^[16]。

广义积分锁相环的原理框图如图6所示，该锁相环采用了两个基于广义积分器的正交信号发生器，分别对电网电压在 (α, β) 坐标系下的 α 分量和 β 分量进行滞后 90° 的相位偏移；再经正、负序计算单元，便能准确检测出电网电压的正序和负序分量；最后，利用单同步坐标系锁相环检测正序电压的相位，锁相环输出频率作为广义积分器的谐振频率^[17-18]。

3.3 广义积分器锁相环的仿真研究

为了验证广义积分器锁相环的性能，在Matlab/Simulink环境下搭建如图7所示的仿真模型，对其进行仿真研究。

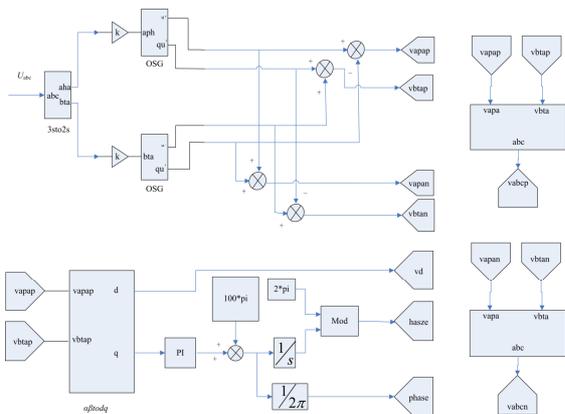


图7 广义积分器锁相环的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of the OSG

(1) 电网电压不平衡的仿真结果

取三相电网电压的幅值分别为： $U_a=0.2$ pu， $U_b=1.0$ pu， $U_c=0.8$ pu，相位互差 120° ，频率 $f=50$ Hz，a相电压初始相位为 0° ，仿真波形如图8所示。

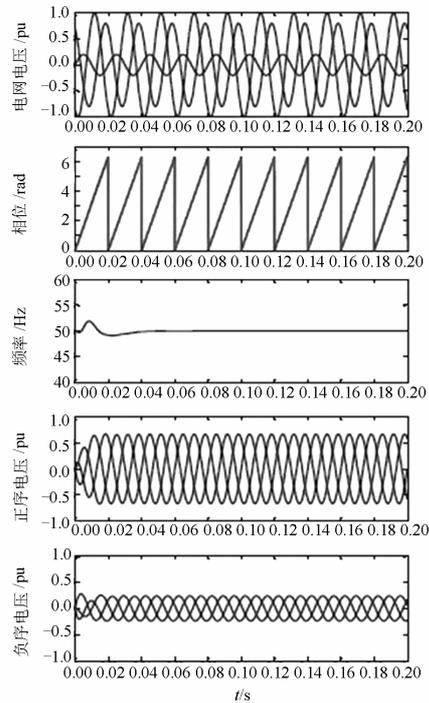


图8 电网电压不平衡的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of voltage unbalance

(2) 电网发生单相接地故障仿真结果

三相电网电压的幅值均为 $U=1.0$ pu，相位互差 120° ，频率 $f=50$ Hz，a相电压初始相位为 0° 。a相电压在 0.18 s发生单相接地故障，仿真波形如图9所示。

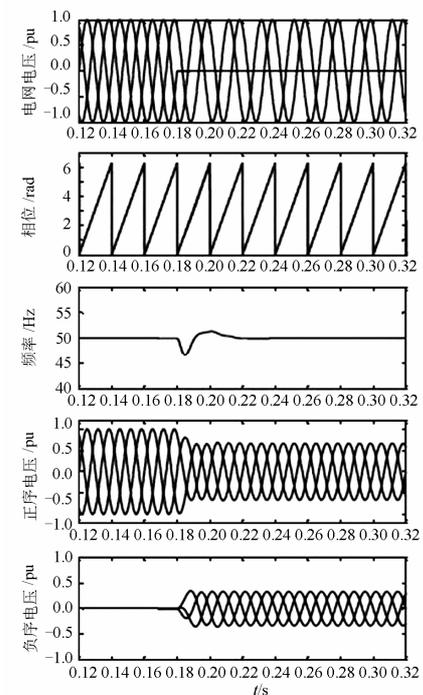


图9 电网发生单相接地故障仿真结果

Fig. 9 Simulation results of single-phase grounding fault

仿真结果表明, 无论是电网电压处于平衡状态还是处于不平衡状态, 广义积分器锁相环都能够快速准确地检测出正序电网电压的相位和频率, 并且可以有效提取出电网电压的正序与负序分量; 当电网电压发生单相接地故障时, 广义积分器锁相环能够快速准确地检测出正序电网电压的相位和频率, 并且可以有效提取出电网电压的正序与负序分量。以上结果表明, 广义积分器锁相环适用于电网不平衡时的情况, 且具有很好的性能。

(3) 电网频率突变的仿真结果

三相电网电压的幅值均为 $U=1.0$ pu, 相位互差 120° , 频率 $f=50$ Hz, a相电压初始相位为 0° 。电网电压的频率在0.12 s由50 Hz突变为40 Hz, 仿真波形如图10所示。

(4) 电网含有低次谐波的仿真结果

在电网电压的a相和b相注入负序5次谐波(幅值0.1 pu, 负序), 仿真波形如图11所示。

仿真结果表明, 当电网电压发生频率突变(50 Hz突变为40 Hz)时, 要经过约一个周期的时间(根据突变频率不同系统调整时间有细微的变化), 广义积分器锁相环便能够重新准确检测出正序电网电压的相位和频率, 广义积分器锁相环具有良好的频率自适应特性; 当电网电压含有一定量的低次谐波时, 广义积分器锁相环仍可以准确地检测出正序电网电压的相位, 但检测出的频率含有微小幅值的谐波, 广义积分器锁相环对低次谐波有良好的抑制作用。

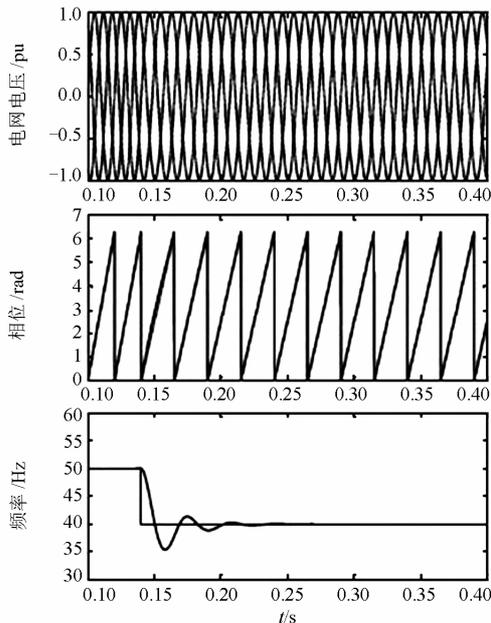


图10 电网频率突变的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of frequency change

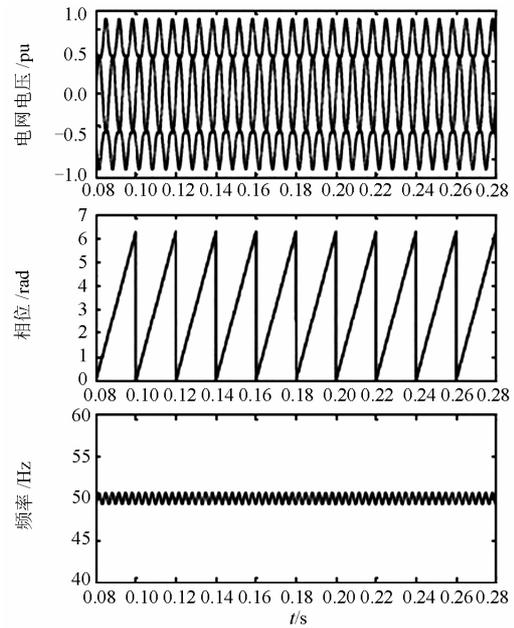


图11 电网含有低次谐波的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of low-order harmonic

4 结论

本文在分析对称分量法及单同步坐标系锁相环基本原理的基础上, 提出了广义积分器锁相环的设计方法, 这种方法在 (α, β) 坐标系下对电网电压进行正、负分序, 进而锁定正序电压的相位和频率; 仿真结果验证了广义积分器锁相环在电网不平衡时不仅能提取出电网电压的正、负序分量, 而且可以准确地检测出正序电压分量的相位和频率, 具有良好的频率自适应性且对低次谐波有一定的抑制作用。

参考文献

- [1] 丁菊霞, 张华俊, 张秀峰. 一种改进的无锁相环三相电路谐波电流检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 41-45.
DING Ju-xia, ZHANG Hua-jun, ZHANG Xiu-feng. An improved method without PLL on harmonics detection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 41-45.
- [2] 张志霞, 朴在林, 郭丹, 等. 一种应用于电力系统的锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 250-254.
ZHANG Zhi-xia, PIAO Zai-lin, GUO Dan, et al. A kind of phase-locked loop for power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 250-254.
- [3] 侯世英, 张诣. 电压频率偏移条件下新型锁相环在三相电压型 PWM 整流器中的应用[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2011, 39(17): 74-79.
- HOU Shi-ying, ZHANG Yi. The application of the novel phase-locked loop in three-phase voltage source PWM rectifier under frequency offset of voltage[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 74-79.
- [4] 孙强, 尹忠刚, 钟彦儒. 基于 α - β 静止坐标系的 PWM 整流器双单输入单输出模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(23): 73-80.
- SUN Qiang, YIN Zhong-gang, ZHONG Yan-ru. A dual single-input single-output model of PWM rectifier based on α - β stationary frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(23): 73-80.
- [5] 丁奇, 严东超, 曹启蒙. 三相电压型 PWM 整流器控制系统设计方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 84-87.
- DING Qi, YAN Dong-chao, CAO Qi-meng. Research on design method of control system for three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 84-87.
- [6] GENG H, XU D, WU B. A novel hardware based all digital phase-locked-loop applied to grid-connected power converters[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2011, 58(5): 1737-1745.
- [7] RODRÍGUEZ P, LUNA A, TEODORESCU M, et al. Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions[C] // Proceedings of 2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Wisconsin, USA, Sep 10-11, 2006: 5173-5178.
- [8] 刘成义, 张学广, 景卉, 等. 电网电压正负序分量快速检测算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 217-222.
- LIU Cheng-yi, ZHANG Xue-guang, JING Hui, et al. Fast detection algorithm of grid voltage positive and negative sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 217-222.
- [9] RODRÍGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Double synchronous reference frame PLL for power converters control[C] // Proceedings of 2005 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Wisconsin, USA, Sep 10-11, 2005: 1415-1421.
- [10] SAITOU M, MATSUI N, SHIMIZU T. A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation[C] // Proceeding of 2010 IEEE Industry Applications Conference, 2010: 1222-1227.
- [11] TEODORESCU R, BLAABJERG F, BORUP U, et al. A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation[C] // Proceedings of 2004 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Florida, USA, Feb 2-6, 2004: 580-586.
- [12] RODRÍGUEZ P, TEODORESCU R, BLAABJERG F. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions[C] // Proceedings of 2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Wisconsin, USA, Sep 10-11, 2006: 1-7.
- [13] 王冲, 於峰, 陈荣. 基于广义积分器的电力单相锁相环研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 13-22.
- WANG Chong, YU Feng, CHEN Rong. Study on control strategy for single-phase power phase-locked loop with generalized integrator[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 13-22.
- [14] YAZDANI D, BAKHSHAI A, JAIN P K. A three-phase adaptive notch filter-based approach to harmonic/reactive current extraction and harmonic decomposition[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(4): 914-923.
- [15] YAZDANI D, MOJIRI M, BAKHSHAI A, et al. A fast and accurate synchronization technique for extraction of symmetrical components[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2009, 24(3): 674-684.
- [16] KARIMI-GHARTEMANI M, IRAVANI M R. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.
- [17] TIMBUS A, RODRÍGUEZ P, TEODORESCU R, et al. Control strategies for distribute power generation systems operating on faulty grid[C] // Proceedings, of 2006 IEEE International Symposium Industrial Electronics, Québec, Canada, July 9-13, 2006: 1601-1607.
- [18] GONZALEZ-ESPIN F, GARCERA G, PATRAO I, et al. An adaptive control system for three-phase photovoltaic inverters working in a polluted variable frequency electric grid[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2012, 27(10): 4248-4261.

收稿日期: 2013-11-30; 修回日期: 2014-01-21

作者简介:

胡应占(1972-), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电气传动系统与控制、微机控制等; E-mail: huyz168@163.com

郭素娜(1981-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力电子、自动控制。