

# 分布式发电系统电网同步锁相技术

王宝诚, 伞国成, 郭小强, 邬伟扬

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学电气工程学院), 河北省 秦皇岛市 066004)

## Grid Synchronization and PLL for Distributed Power Generation Systems

WANG Baocheng, SAN Guocheng, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor drive of Hebei province (College of Electrical Engineering, Yanshan University), Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** Grid Synchronization is one of the key techniques for integration of distributed generation systems with high penetration of renewable energy sources into grid. In order to achieve the fast and accurate grid synchronization, a new phase-locked loop based on the crossing-decoupling frequency-adaptive complex filter was proposed. The operation principle was analyzed. Mathematical models in the frequency-domain and time-domain were built, which clarify the mechanism of decoupling the voltage positive and negative sequences. From the eigenvalue analysis point of view, the stability and dynamic performance were evaluated. The digital implementation method was also provided. In addition, its application to the single-phase system was discussed. Finally, the performance tests were carried out under the distorted and unbalanced grid voltage conditions. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

**KEY WORDS:** distributed generation; grid synchronization; phase-locked loop; positive sequence

**摘要:** 电网同步锁相是大规模可再生能源分布式发电系统并网运行需要解决的关键问题之一。为实现快速准确的电网同步, 提出一种基于交叉解耦频率自适应复数滤波的锁相方法, 分析其工作原理, 建立其频域数学模型和时域数学模型, 阐明电压正序分量和负序分量的解耦机理, 从特征值角度对其稳定性和动态性能进行评估, 给出离散域数字化实现方法, 并对其在单相系统中的应用进行了探讨。最后在电网电压畸变/不平衡情况下对所提锁相方法进行了实验测试, 结果验证了该锁相环的有效性。

**关键词:** 分布式发电; 电网同步; 锁相环; 正序分量

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50837003); 河北省高等学校科学研究项目(2011249); 河北省自然科学基金项目(E2012203023)。

National Natural Science Foundation of China (50837003); Hebei Province University Science Research Foundation (2011249); Hebei Province Natural Science Foundation (E2012203023).

## 0 引言

基于太阳能、风能等可再生能源的分布式发电已受到各国的高度重视。为了实现大规模可再生能源接入电网, 需要解决一系列的技术难题。其中, 电网同步锁相是分布式发电系统并网运行最基本的技术要求之一<sup>[1]</sup>。锁相环(phase-locked loop, PLL)是获得相位信息的常用方法, 早在 20 世纪初, 学者 Appleton 和 Bellesciz 就提出了锁相环的概念, 最初用于无线电信号的同步接收。此后, 锁相环 PLL 开始被广泛应用于工业领域<sup>[2]</sup>, 如通信系统、电机控制系统<sup>[3]</sup>、不间断电源<sup>[4]</sup>等。近年来, 随着可再生能源技术的迅猛发展, PLL 开始在分布式发电系统电网同步中得到应用<sup>[1]</sup>。

PLL 可分为单相 PLL 和三相 PLL 两大类。一般而言, 理想的单相 PLL 具有以下特性: 在电网电压畸变或扰动情况下能够快速精确地获得电压同步相位信息<sup>[5]</sup>。和单相 PLL 要求不同, 由于三相电网电压中除了单相系统存在的畸变或扰动外, 还存在负序扰动, 具体表现在三相电压不平衡。因此三相 PLL 有更高的要求, 即在电网电压畸变或扰动(包括负序扰动)情况下能够快速精确地获得电网电压正序分量的相位信息<sup>[1]</sup>。三相 PLL 按结构可分为开环 PLL 和闭环 PLL 两类。

基于过零点检测(zero crossing detection, ZCD)的锁相方法是典型的开环 PLL, 该方法对输入信号谐波或扰动较为敏感且实时性较差<sup>[6]</sup>, 因此不适用于环境恶劣的工业现场。但其原理简单、实现方便, 可用于电网电压波形质量较好的应用场合。

闭环 PLL 可分为线性 PLL 和非线性 PLL 两类。基于同步坐标系的 SRF-PLL(synchronous rotating

frame-PLL)是目前广泛采用的线性闭环 PLL 之一<sup>[7]</sup>。当电网电压出现畸变时,适当降低 SRF-PLL 带宽可以获得较为精确的相位信息,但其动态响应速度降低。当电网电压不平衡时,即使降低 SRF-PLL 带宽,相位信息中仍会有 2 倍频误差分量<sup>[1]</sup>。许多学者为了解决此问题研究出多种改进 PLL,其基本思想是:首先对畸变或不平衡的电压进行滤波得到电压基波正序分量,然后将其送入 SRF-PLL 得到电网电压正序分量的相位信息。文献[8]提出一种基于通用积分器的正序滤波器(positive sequence filter, PSF)用于提取电压基波正序分量,与之类似的还有正弦信号积分器(sinusoidal signal integrator, SSI)<sup>[9]</sup>和双二阶通用积分器(double second order generalized integrator, DSOGI)<sup>[10]</sup>等。文献[11]提出一种基于双同步旋转坐标系的 DSRF PLL (dual synchronous rotating frame PLL),其中正序和负序分量通过解耦网络分离,并将正序分量送入 SRF-PLL。

另一方面,加拿大学多伦多大学 Ghartemani 博士提出了一种加强型锁相环 EPLL(enhanced-PLL),其核心为自适应滤波器<sup>[12]</sup>。和大多数线性 PLL 工作原理不同,EPLL 首先提取出每相电压基波分量及其正交分量,然后利用对称分量法提取电压的正序信息<sup>[13]</sup>。和 EPLL 类似,加拿大女王大学 Yazdani 博士提出一种基于自适应陷波器 ANF(Adaptive Notch Filter)的同步技术<sup>[14]</sup>,动态性能优于 EPLL<sup>[15]</sup>。此外,文献[16]提出一种基于数学矩阵运算的同步方法,通过对称分量法及相应的矩阵变换求解电网电压正序分量,然后将其送入 SRF-PLL,从而获得电网电压正序分量的相位信息。值得注意的是,上述几种闭环 PLL 均通过对称分量法<sup>[17]</sup>计算电网电压正序分量的相位信息。

本文将提出一种分布式发电系统并网同步方法,该方法无需对称分量法,在电网电压畸变和不平衡情况下,可以快速准确地计算出电网电压正序分量及其相位信息,具有原理简单、便于实现、三相/单相系统均适用等特点。

## 1 提出的锁相环

图 1 为本文提出的基于交叉解耦自适应复数滤波器的电网同步锁相环,已获中国发明专利权(专利号: ZL 2009 1 0075070.2)。

图 1 中,三相电网电压信号  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  经过 Clarke 变换得到  $\alpha\beta$  坐标系下的电压信号  $U_\alpha$  和  $U_\beta$ ,

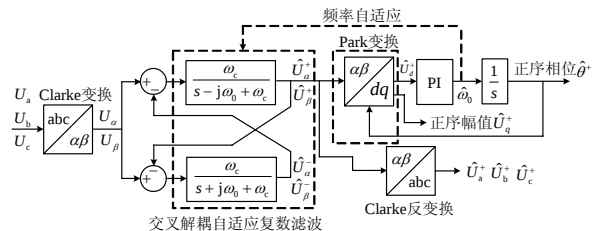


图 1 提出的锁相环

Fig. 1 Proposed phase-locked loop

然后经过交叉解耦自适应复数滤波后得到电压正序分量  $\hat{U}_\alpha^+$  和  $\hat{U}_\beta^+$ , 再经过 Park 变换得到  $dq$  坐标系下的  $d$  轴分量  $\hat{U}_d^+$ ; 将  $d$  轴分量  $\hat{U}_d^+$  经过 PI 调节器后得到频率估计值  $\hat{\omega}_0$ , 将其经过积分  $1/s$  得到电网电压正序分量的相位信息  $\hat{\theta}^+$ 。下文详细分析图 1 所示锁相环的工作原理。

为了便于分析,首先忽略三相电网电压中的谐波分量,设三相电网电压  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega_0 t + \theta_p) + U_m^- \sin(-\omega_0 t + \theta_n) \\ U_m^+ \sin(\omega_0 t - 120^\circ + \theta_p) + U_m^- \sin(-\omega_0 t - 120^\circ + \theta_n) \\ U_m^+ \sin(\omega_0 t + 120^\circ + \theta_p) + U_m^- \sin(-\omega_0 t + 120^\circ + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $U_m^+$ 、 $\omega_0$  和  $\theta_p$  分别为正序电压幅值、频率和相位;  $U_m^-$ 、 $\omega_0$  和  $\theta_n$  分别为负序电压幅值、频率和相位。

将式(1)进行 Clarke 变换后,可得  $\alpha\beta$  坐标系下电压:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\alpha^+ + U_\alpha^- \\ U_\beta^+ + U_\beta^- \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_\alpha^+ \\ U_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega_0 t + \theta_p) \\ -U_m^+ \cos(\omega_0 t + \theta_p) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_\alpha^- \\ U_\beta^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^- \sin(-\omega_0 t + \theta_n) \\ -U_m^- \cos(-\omega_0 t + \theta_n) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_\alpha^+$ 、 $U_\alpha^-$  为  $U_\alpha$  的正序分量和负序分量;  $U_\beta^+$ 、 $U_\beta^-$  为  $U_\beta$  的正序分量和负序分量。

由式(1)和 (2)可知,电网电压正序和负序分量频率绝对值均为  $\omega_0$ ,但极性相反(正序频率为  $\omega_0$ ,负序频率为  $-\omega_0$ )。若要将电网电压中的正序分量滤出,所需滤波器必须满足频率  $\omega_0$  处幅频特性为 1、相频特性为 0,同时在其他频率处呈衰减趋势。满足上述条件的滤波器传递函数  $F(s)$  可表示为

$$F(s) = \frac{N(s)}{(s - j\omega_0)D(s) + N(s)} \quad (3)$$

为了便于设计, 采用一阶正序滤波器:

$$F(s) = \frac{\omega_c}{s - j\omega_0 + \omega_c} \quad (4)$$

式中 $\omega_c$ 为正序滤波器的截止频率。

正序滤波器的幅频特性和相频特性为

$$|F(j\omega)| = \frac{\omega_c}{\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 + \omega_c^2}} \quad (5)$$

$$\angle F(j\omega) = -\arctan\left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_c}\right) \quad (6)$$

图2给出了正序滤波器的波特图。可以看出, 电网电压正序分量经过正序滤波器时可以无衰减零相移地通过, 而负序分量经过正序滤波器后幅值衰减度为 $\omega_c / (\sqrt{4\omega_0^2 + \omega_c^2})$ 且相移 $\arctan(2\omega_0 / \omega_c)$ 。这说明电网电压通过此滤波器后虽然可以完全提取出正序分量, 但其中仍含有一定的负序分量, 即电压正序和负序分量仍然耦合在一起。

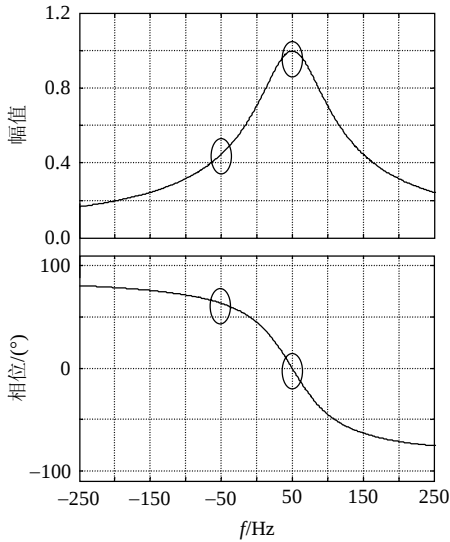


图2 正序滤波器波特图

Fig. 2 Bode diagram of positive sequence filter

为了将电网电压正序和负序分量的解耦, 实现正序分量精确估计, 提出一种交叉解耦复数滤波器如图3所示。

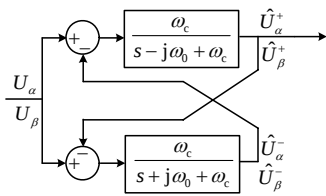


图3 交叉解耦复数滤波器

Fig. 3 Crossing decoupling complex filter

下文分析交叉解耦复数滤波器输入和输出之间的关系。首先建立滤波器频域数学模型如下:

$$\begin{cases} \hat{U}_\alpha^+(s) = \frac{\omega_c}{s - j\omega_0 + \omega_c} (U_\alpha(s) - \hat{U}_\alpha^-(s)) \\ \hat{U}_\beta^+(s) = \frac{\omega_c}{s - j\omega_0 + \omega_c} (U_\beta(s) - \hat{U}_\beta^-(s)) \\ \hat{U}_\alpha^-(s) = \frac{\omega_c}{s + j\omega_0 + \omega_c} (U_\alpha(s) - \hat{U}_\alpha^+(s)) \\ \hat{U}_\beta^-(s) = \frac{\omega_c}{s + j\omega_0 + \omega_c} (U_\beta(s) - \hat{U}_\beta^+(s)) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)的频域数学模型可以得到滤波器时域数学模型:

$$\begin{cases} \dot{\hat{U}}_\alpha^+ = \omega_c U_\alpha - \omega_c \hat{U}_\alpha^- - \omega_c \hat{U}_\alpha^+ - \omega_0 \hat{U}_\beta^+ \\ \dot{\hat{U}}_\beta^+ = \omega_c U_\beta - \omega_c \hat{U}_\beta^- - \omega_c \hat{U}_\beta^+ + \omega_0 \hat{U}_\alpha^+ \\ \dot{\hat{U}}_\alpha^- = \omega_c U_\alpha - \omega_c \hat{U}_\alpha^+ - \omega_c \hat{U}_\alpha^- + \omega_0 \hat{U}_\beta^- \\ \dot{\hat{U}}_\beta^- = \omega_c U_\beta - \omega_c \hat{U}_\beta^+ - \omega_c \hat{U}_\beta^- - \omega_0 \hat{U}_\alpha^- \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)建立系统状态空间模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t) = [\hat{U}_\alpha^+ \quad \hat{U}_\beta^+ \quad \hat{U}_\alpha^- \quad \hat{U}_\beta^-]^T;$$

$$\mathbf{u}(t) = [U_\alpha \quad U_\beta \quad U_\alpha \quad U_\beta]^T;$$

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -\omega_c & -\omega_0 & -\omega_c & 0 \\ \omega_0 & -\omega_c & 0 & -\omega_c \\ -\omega_c & 0 & -\omega_c & \omega_0 \\ 0 & -\omega_c & -\omega_0 & -\omega_c \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} \omega_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \mathbf{I}.$$

状态方程式(9)的解为

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (10)$$

由式(10)可知, 状态方程的解包括稳态分量和暂态分量两部分, 暂态分量主要由 $\omega_c$ 决定, 稳态分量可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \hat{U}_\alpha^+ \\ \hat{U}_\beta^+ \\ \hat{U}_\alpha^- \\ \hat{U}_\beta^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega_0 t + \theta_p) \\ -U_m^+ \cos(\omega_0 t + \theta_p) \\ U_m^- \sin(-\omega_0 t + \theta_n) \\ -U_m^- \cos(-\omega_0 t + \theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\alpha^+ \\ U_\beta^+ \\ U_\alpha^- \\ U_\beta^- \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)可知, 本文提出的滤波器(图3)可实现电网电压正负序分量解耦, 从而可以精确估计出电压正序分量。

由上述分析可知,在电网电压频率确定情况下,所提滤波器可以精确估计电网电压的正序分量。然而实际应用中电网电压频率可能存在波动或偏移。若频率偏移范围较小,如 IEEE Std. 1547 允许偏移范围 $(-0.7, 0.5)$  Hz,该滤波器输出电压正序分量估计误差较小。然而当电压频率大范围波动(如 $\pm 3$  Hz<sup>[10]</sup>)时,电压正序分量估计误差将增大。为了减小或消除误差,有必要对滤波器参数进行调整,实现频率自适应调节,如图1所示。当电压频率出现波动时,可以通过将频率估计值 $\hat{\omega}_0$ 反馈至滤波器实现频率自适应调整功能。

## 2 参数设计及数字实现

如第1节所述,稳态情况下,本文提出的滤波器可以实现电网电压正序分量的准确估计。暂态情况下,滤波器动态响应主要取决于参数 $\omega_c$ 。为了实现较快的动态特性,同时满足较好的滤波效果,有必要对参数 $\omega_c$ 进行优化设计。

特征值分析是评估状态空间系统稳定性和动态性能常用的方法之一。一般而言,特征值均具有负实部,说明系统稳定;特征值距离虚轴越远,说明系统动态响应越快。根据式(9)中的状态矩阵 $\mathbf{A}$ 可得参数 $\omega_c$ 不同取值情况下系统的主导特征值分布,如图4所示。当参数 $\omega_c$ 由10增加至314过程中,系统主导特征值离虚轴越来越远,说明系统动态性能增强;当参数 $\omega_c$ 由314增加至400过程中,系统主导特征值离虚轴越来越近,说明系统动态响应变慢。综合考虑滤波效果和动态性能,选择 $\omega_c=314$ 。

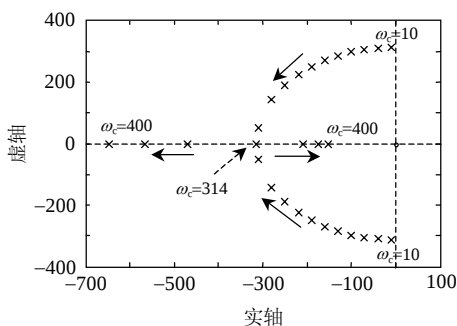


图4 主导特征值分布

Fig. 4 Dominant eigenvalues distribution

图5为滤波器的实现结构图。可以看出,滤波器由加/减/乘法和积分构成,因此实际应用中易于实现。值得注意的是,图5中加/减/乘法的连续域和离散域表达式相同,因此,数字实现时只需对积分进行离散化设计,变换公式如下:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{s} \Leftrightarrow \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{T_s}{12} \frac{23z^{-1} - 16z^{-2} + 5z^{-3}}{1 - z^{-1}} \quad (12)$$

式中:  $T_s$  为采样周期;  $u$  和  $y$  为积分器的输入和输出。

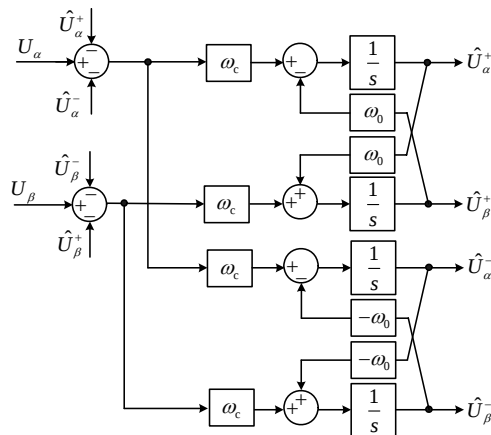


图5 滤波器实现

Fig. 5 Implementation of the proposed filter

## 3 单相系统应用

从原理上讲,本文提出的 PLL 属于三相 PLL,看上去似乎无法直接应用于单相系统。主要原因是,和三相系统不同,单相系统只有一相电压信息,从常规角度考虑无法直接应用本文提出的 PLL。

换角度考虑,单相可以看作是三相不平衡的一个特例<sup>[18]</sup>,即三相中一相供电、两相断电的情况,如式(13)所示,其中  $U_g$ 、 $U_m$  和  $\theta_g$  分别为电网电压、电压幅值和相位。

$$\begin{bmatrix} U_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \sin(\omega_0 t + \theta_g) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)进行 Clarke 变换可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{3} U_g \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} U_m \sin(\omega_0 t + \theta_g) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据对称分量法可知<sup>[19]</sup>:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha^+ \\ U_\beta^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中  $q=e^{-j\pi/2}$ , 表示相移  $90^\circ$ (滞后)。

将式(14)代入式(15)可得<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} U_g = 3U_\alpha^+ \\ qU_g = 3U_\beta^+ \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知,将单相电压看作是三相不平衡电压特例时(见式(13)),单相电压和三相电压正序分

量同频同相,幅值呈3倍关系。因此,直接将单相信息 $[U_g \ 0 \ 0]^T = [U_a \ U_b \ U_c]^T$ 送入图1所示锁相环,输出电压正序分量 $U_\alpha^+$ 的相位 $\hat{\theta}^+$ 就代表单相电网电压的相位 $\theta_g$ ,而 $U_\beta^+$ 代表单相电网电压的正交分量 $qU_g$ ,从而成功地将该锁相环应用于单相系统。

#### 4 实验结果

为了验证理论分析的正确性,搭建了基于32位定点TMS320F2812 DSP的系统测试平台,DSP工作频率为150 MHz,采样频率为10 kHz,采用DAC7625数模转换芯片输出DSP内部变量(如电压相位信息等),利用任意函数发生器产生各种测试信号,用于评估锁相环的稳态和动态性能。实验波形通过Tek公司TDS2014示波器捕获。

图6为电网电压畸变/不平衡情况下的实验结果。和文献[7]结论一致,传统SRF-PLL无法精确估计电压的幅值和相位信息,误差中主要包含由负序电压引起的100 Hz脉动分量,如图6(b)所示。另一方面,本文提出的锁相环可以快速准确地计算出三相电网电压正序分量及其幅值和相位信息,如图6(c)和(d)所示。

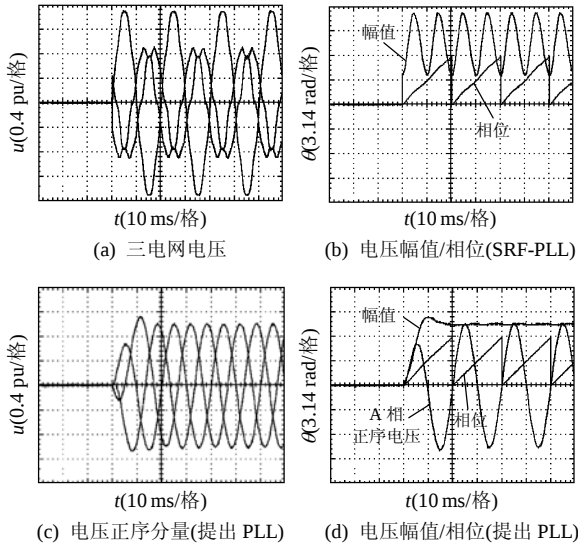


图6 电网电压畸变/不平衡情况下的实验结果

Fig.6 Results under distorted/unbalanced conditions

图7为电网频率变化情况下的实验结果。可以看出,无论是电网频率由50 Hz跳变为40 Hz,还是电网频率由40 Hz跳变为50 Hz,本为所提锁相环均可以在2个工频周期内实现三相电网电压正序分量及其幅值相位信息的准确估计。

图8为单相电网电压畸变且存在缺口情况下的实验结果。由图8(a)和(b)可以看出,本文提出的锁相环不仅可以准确估计出单相电网电压的基波分

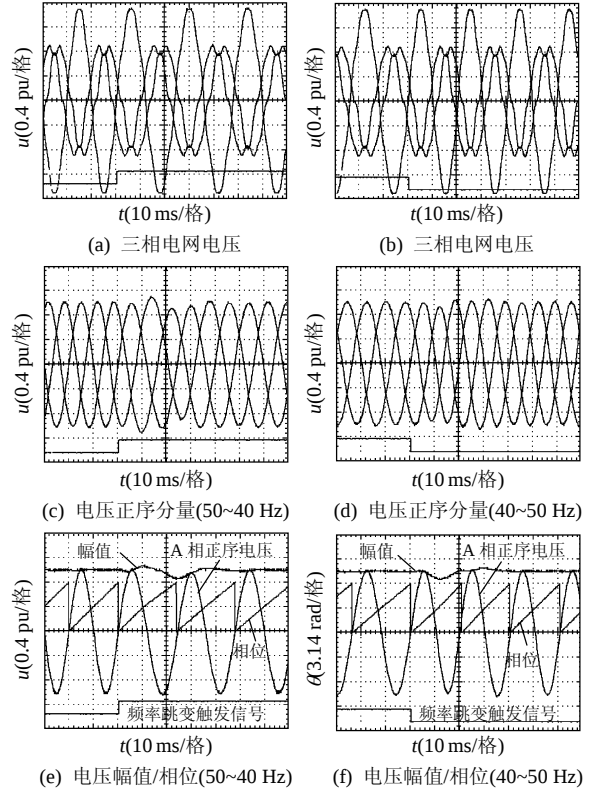


图7 电网频率变化情况下的实验结果

Fig.7 Experimental results under frequency derivation

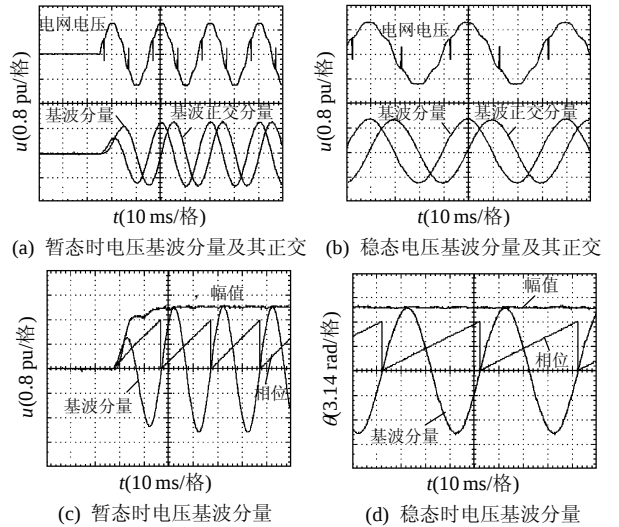


图8 单相实验结果

Fig.8 Single-phase experimental results

量,还可以估计出基波分量的正交分量(见式(16))。由图8(c)和(d)可知,当电网电压畸变且存在缺口情况下,所提锁相环可以实现电压基波分量幅值相位信息的准确估计,验证了提出锁相环在单相系统应用中的有效性。

#### 5 结论

本文提出了一种基于交叉解耦频率自适应复数滤波的电网同步锁相方法,采用交叉解耦复数滤波器实现电网电压正序分量的准确估计,并通过

SRF-PLL 实现滤波器频率自适应功能和正序电压相位估计。实验结果表明,在电网电压畸变/不平衡情况下,基于交叉解耦频率自适应复数滤波的锁相方法可以实现快速准确的电网同步锁相。与传统方法相比,该方法无需对称分量法和大量旋转坐标变换运算,具有原理简单、易于实现、单相/三相均适用等特点,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [2] 李亚斌, 彭咏龙, 李和明. 自采样比例积分控制全数字锁相环的性能分析和实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 64-69.  
Li Yabin, Peng Longyong, Li Heming. The implementation and analysis of a self-sampling PI control all digital phase-locked loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 64-69(in Chinese).
- [3] 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 Jinwen, Wen Xuhui, Chen Jingwei, et al. Novel motor stator flux observer based on PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 41-47(in Chinese).
- [4] Filho R M S, Seixas P F, Cortizo P C, et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2923-2932.
- [5] 李明, 王跃, 方雄, 等. 无正交虚拟信号生成的单相 DQ 锁相环研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 27-32.  
Li Ming, Wang Yue, Fang Xiong, et al. Research on single-phase DQ phase-locked loop without imaginary signal generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 27-32(in Chinese).
- [6] 孔雪娟, 罗昉, 彭力, 等. 基于周期控制的逆变器全数字锁相环的实现和参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 60-64.  
Kong Xuejuan, Luo Fang, Peng Li, et al. Implement and parameter design of DPLL for invertors based on cycle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 60-64(in Chinese).
- [7] Chung S. A phase tracking system for three phase utility interface inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.
- [8] Yuan X, Allmeling J, Merk W, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operation conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.
- [9] Iustin B R, Giovanni G, Valeriu B, et al. Current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1402-1412.
- [10] Timbus A. Grid monitoring and advanced control of distributed power generation systems[D]. Aalborg : Aalborg University, 2007.
- [11] Rodriguez P, Pou J, Bergas J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [12] Ghartemani M K, Iravani M R. A nonlinear adaptive filter for online signal analysis in power systems: applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 617-622.
- [13] Ghartemani M K, Iravani M R. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.
- [14] Yazdani D, Bakhshai A, Joos G, et al. A nonlinear adaptive synchronization technique for grid-connected distributed energy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 2181-2186.
- [15] Yazdani D, Bakhshai A, Joos G, et al. A nonlinear adaptive synchronization technique for single-phase grid-connected converters[C]//Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 4076-4079.
- [16] de Souza H E P, Bradaschia F, Neves F A S, et al. A method for extracting the fundamental-frequency positive-sequence voltage vector based on simple mathematical transformations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1539-1547.
- [17] Paap G. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.
- [18] Milanés-Montero M I, Romero-Cadaval E, de Marcos A R, et al. Novel method for synchronization to disturbed three-phase and single-phase systems[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Vigo, Spain: IEEE, 2007: 860-865.
- [19] Teodorescu R, Liserre M, Rodríguez P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. IEEE-Wiley, 2011: 196-197.



王宝诚

收稿日期: 2012-05-10。

作者简介:

王宝诚(1962), 男, 教授, 研究方向为光伏并网发电系统、脉冲功率电源技术、电力电子电路故障诊断等, bcwang@ysu.edu.cn;

伞国成(1979), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为光伏并网发电系统拓扑及控制技术。

(责任编辑 张玉荣)