

一种双正弦幅值积分器解耦锁相环的设计

徐青青, 陈莹, 刘莉, 张锦

(宿迁学院, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 针对在电网三相电压不平衡时传统锁相环不能准确检测基波正序相位的问题, 设计了一种双正弦幅值积分器解耦锁相环(decoupled double sinusoidal amplitude integrator phase-locked loop, DDSAI-PLL)。该锁相环利用正弦幅值积分器的频率选择特性, 在 $\alpha\beta$ 坐标系下采用正负序解耦结构实现了正序分量的完全提取。同时引入一阶负反馈系统作为频率自适应环节, 使锁相环在电网频率发生偏移时仍然可以对基波正序频率进行准确估计。建立了 DDSAI-PLL 的数学模型, 并对其关键参数进行了设计。最后使用 DSP 实现该锁相环, 并在电压畸变条件下与传统的同步参考坐标系锁相环(SRF-PLL)进行了对比实验, 结果证明了所提锁相方法的有效性。

关键词: 正弦幅值积分器; 交叉解耦; 数学建模; 锁相环; DSP

Design of decoupled double sinusoidal amplitude integrator phase-locked loop

XU Qingqing, CHEN Ying, LIU Li, ZHANG Jin

(Suqian College, Suqian 223800, China)

Abstract: Under conditions of the distorted grid, the traditional phase-locked loop (PLL) cannot accurately extract fundamental positive sequence. For the problem, a decoupled double sinusoidal amplitude integrator phase-locked loop (DDSAI-PLL) is designed. DDSAI-PLL uses a crossing decoupling structure based on sine amplitude integrator (SAI), to achieve the separation of positive and negative sequence components. And the introduction of frequency adaptive module makes DDSAI-PLL have the phase frequency adaptive ability. The working principle of DDSAI-PLL is introduced, its mathematical model is established, and the key parameters are analyzed. Finally, DDSAI-PLL is realized by using DSP and is compared with the traditional synchronous reference frame phase locked loop (SRF-PLL) under the condition of voltage distortion. The results show that the proposed method is effective.

This work is supported by Natural Science Foundation of China Youth Fund of Jiangsu Province (No. BK20140586), and Natural Science Foundation for Universities of Jiangsu Education Department (No. 13KJD460007), Suqian Science and Technology Support Program (Industry) (No. H201516), and Scientific Research Fund of Suqian College (No. 2016KY27 and No. 2014KY08).

Key words: sine amplitude integrator (SAI); cross decoupling; mathematical modeling; phase-locked loop (PLL); DSP

0 引言

近年来, 随着光伏发电、风电等新能源迅速发展, 随着 SVG、APF 等无功补偿设备的大量使用, 三相并网逆变器得到了越来越广泛的应用^[1-2]。三相并网逆变器的正常工作需要与电网保持同步, 即需要实时准确地获得电网电压基波正序的频率与相位信

息^[3]。锁相环是获取相位信息普遍采用的方法, 其性能直接影响了并网逆变器的控制性能^[4-5]。锁相环可以分为开环与闭环两种, 开环锁相环实现简单但精度较低, 动态性能较差, 在现实中应用较少^[6]。在闭环锁相环中, SRF-PLL 将三相电压转换到同步旋转的 dq 坐标系下, 将 q 轴分量作为误差对检测出的相位进行实时调节^[7-8]。在三相电压平衡的情况下, SRF-PLL 能准确检测出基波正序的相位^[9]。但是当三相电压不平衡时, 受负序分量的影响, q 轴分量中会出现 2 倍工频的成分, 从而使锁相精度降低; 并且当电网频率发生偏移时, SRF-PLL 的检测结果也会产生较大的误差。为了解决这一问题, 许多学

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK20140586); 江苏省教育厅高校自然科学基金(13KJD460007); 宿迁市科技支撑计划项目(工业)(H201516); 宿迁学院科研基金(2016KY27, 2014KY08)

者提出了多种改进方案。文献[10]提出了一种采用双同步坐标系解耦的锁相环(DDSRF-PLL), 将电网电压分别转换到正向与反向的两个 dq 坐标系下, 来实现正负序分量的解耦。DDSRF-PLL 可以较好地消除负序分量的影响, 但是结构较为复杂并且对谐波抑制能力较差。文献[11]提出了一种基于双二阶广义积分器的锁相环(DSOGI-PLL), 在 $\alpha\beta$ 坐标系下利用二阶广义积分器的带通特性得到基频分量, 但是此基频分量不能区分正负序, 还需使用对称分量法实现正序分量的提取。文献[12]提出了一种基于矩阵的锁相方法, 通过对称分量法与相应的矩阵运算提取基波正序分量, 再使用 SRF-PLL 实现相位检测。文献[13]提出了一种基于最小误差二乘滤波器的锁相环(PLL-LES), 将每一相电压都经过 LES 滤波器得到其基波正序分量和对应的正交分量, 再通过对称分量法实现正负序分量的分离。但这两种方法计算量较大, 并且仍需要对称分量法来提取正序分量。

为了提高锁相环在不平衡电网条件下的快速性与准确性, 本文提出了一种双正弦幅值积分器锁相环(DDSAI-PLL), 该锁相环一方面采用交叉解耦双正弦幅值积分器实现了电压正负序分量的分离, 另一方面引入了频率自适应环节, 实现了对基波正序分量的频率的跟踪, 在电网电压不平衡或是频率发生偏移时都可以准确快速地对基波正序频率与相位的检测。而且该锁相环结构简单, 无需对称分量法, 易于数字控制器实现, 具有一定的实际意义。

1 正弦幅值积分器(SAI)

正弦幅值积分器可以实现正弦信号幅值对时间的积分^[14], 其传递函数为

$$H(s) = \frac{\omega_0}{s - j\omega_0} \quad (1)$$

由式(1)可知, 正弦幅值积分器具有一阶复数传递函数, 其幅频特性与相频特性分别为

$$|H(j\omega)| = \left| \frac{\omega_0}{\omega - \omega_0} \right| \quad (2)$$

$$\angle H(j\omega) = \begin{cases} +90^\circ & \omega < \omega_0 \\ -90^\circ & \omega > \omega_0 \end{cases} \quad (3)$$

当 $\omega_0=100\pi$ rad/s 时, SAI 的幅频与相频特性如图 1 所示。可以看出, SAI 对不同频率的输入信号具有选择能力, 有类似于带通滤波器的特性, ω_0 相当于其中心角频率。其幅频特性在角频率等于 ω_0 时具有谐振峰; 而对于其他频率的信号, 正弦幅值积分器都有一定程度的衰减作用。

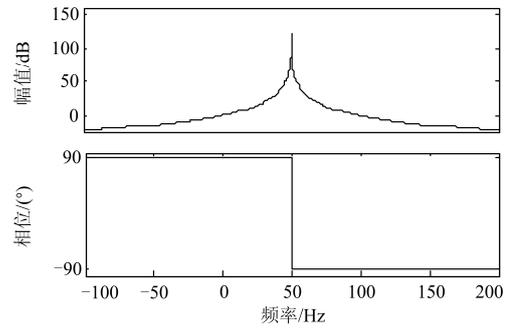


图 1 SAI 幅频特性与相频特性

Fig. 1 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of SAI

由于传递函数中含有复数, 正弦幅值积分器不能像实数域传递函数一样使用单输入单输出的实现形式, 而是应该采用一对正交信号作为输入信号, 同时输出一对正交信号, 在内部采用交叉解耦的结构实现复数域传递函数^[15]。

假设有一对正交的正弦信号 $U_\alpha = \cos(\omega_0 t)$ 与 $U_\beta = \sin(\omega_0 t)$, 经过正弦幅值积分器积分后的输出分别为 \tilde{U}_α 与 \tilde{U}_β 。在复频域中有:

$$\frac{\tilde{U}_\alpha(s)}{U_\alpha(s)} = \frac{\omega_0}{s - j\omega_0} \quad (4)$$

虚数单位 j 在复频域中意味着向前移相 $\pi/2$, 即 $\tilde{U}_\beta(s) = -j\tilde{U}_\alpha(s)$, 则式(4)可以改写微分方程的形式。同理, 对于信号 U_β 也可以做类似变换, 则可以得到关于 U_β 的微分方程。这两个微分方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{U}}_\alpha(s) = \omega_0 U_\alpha - \omega_0 \tilde{U}_\beta(s) \\ \dot{\tilde{U}}_\beta(s) = \omega_0 U_\beta + \omega_0 \tilde{U}_\alpha(s) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可以得到图 2 所示的正弦幅值积分器结构框图。

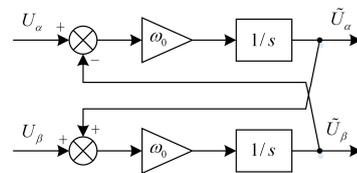


图 2 正弦幅值积分器结构框图

Fig. 2 Structure diagram of SAI

在控制系统中, 若在积分环节前加上一个负反馈环节, 可以实现对直流量的无静差跟踪。与之类似的, SAI 相当于对正弦信号的积分环节, 若在其输入端加入负反馈环节, 就可以实现对正弦量的无

静差跟踪^[16]，其具体结构如图 4 中虚线框中所示。根据这一特性可以使用正弦幅值积分器对电压基波正序分量进行提取。

2 双正弦幅值积分器解耦锁相环原理

2.1 双正弦幅值积分器正负序解耦方法

在电网三相电压不平衡时，根据对称分量法，将电网电压矢量分解为正序分量、负序分量与零序分量。零序分量可以通过 Clarke 变换方便滤除，这里只考虑正负序分量，即

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}^T = U^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi^+) \\ \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + \phi^+) \\ \cos(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} + \phi^+) \end{bmatrix} + U^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega_0 t + \phi^-) \\ \cos(-\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + \phi^-) \\ \cos(-\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} + \phi^-) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： U^+ 、 ϕ^+ 、 U^- 、 ϕ^- 分别为正负序分量的幅值与相位； ω_0 为电网基波角频率。

对式(6)进行 Clarke 变换之后，可以得到 $\alpha\beta$ 坐标系下电压分量为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha^+ \\ u_\beta^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha^- \\ u_\beta^- \end{bmatrix} = U^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \phi^+) \\ \sin(\omega_0 t + \phi^+) \end{bmatrix} + U^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega_0 t + \phi^-) \\ \sin(-\omega_0 t + \phi^-) \end{bmatrix} \quad (7)$$

正序分量 u_α^+ 、 u_β^+ 与负序分量 u_α^- 、 u_β^- 各是一对正交信号。正序分量可以使用图 2 所示的正序正弦幅值积分器 SAI(ω_0) 实现无静差跟踪。对于负序分量，可以构造负序正弦幅值积分器 SAI($-\omega_0$) 进行跟踪，其传递函数为

$$H(s) = \frac{\omega_0}{s + j\omega_0} \quad (8)$$

结构框图为如图 3 所示，SAI($-\omega$) 对应的中心频率为 $-\omega_0$ ， $U_\alpha^- = \cos(\omega_0 t)$ ， $U_\beta^- = \sin(-\omega_0 t)$ 。

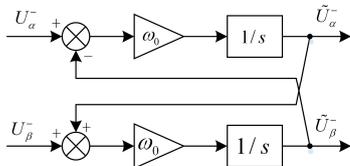


图 3 负序正弦幅值积分器结构图

Fig. 3 Structure diagram of negative sequence SAI

从图 1 可以看出，虽然 SAI 对中心频率以外的

频率信号有衰减作用，但是衰减度并不为零，所以使用单一的 SAI 不能实现正负序分量的完全分离。为解决这一问题，可以使用 SAI(ω_0) 与 SAI($-\omega_0$) 分别对正负序分量进行跟踪，再通过交叉解耦的方式将正负序分量完全分离，从而实现了正序分量的提取。图 4 为正序分量提取模块的原理图，其中虚线框中部分是 SAI 在输入端加入负反馈后的结构，可以实现对中心频率处正弦信号的无静差跟踪，并且对其余频率的信号进行一定程度的衰减。 k 为 SAI 的实常数反馈系数，为保证系统的稳定性，应保证 $k > 0$ ； \hat{u}_α^+ 、 \hat{u}_β^+ 与 \hat{u}_α^- 、 \hat{u}_β^- 分别是进行双 SAI 解耦后分离出的正负序分量。将 \hat{u}_α^+ 、 \hat{u}_β^+ 作为 SRF-PLL 的输入，就可以实现对基波正序相位的实时跟踪，SRF-PLL 的结构如图 5 所示。

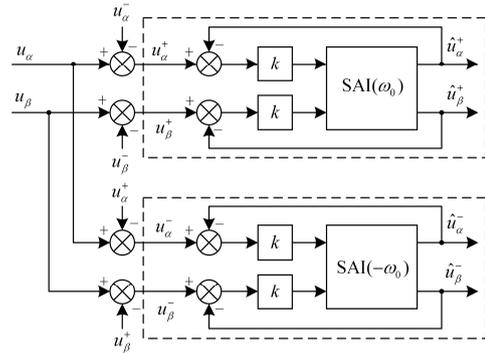


图 4 SAI 正序分量提取模块

Fig. 4 Positive sequence component extraction module based on double SAI

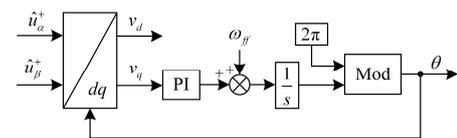


图 5 单同步参考坐标系锁相环结构图

Fig. 5 Structure diagram of SRF-PLL

2.2 反馈系数设计

由图 4 可以得出 SAI 正序分量提取模块在复频域的传递函数为

$$\begin{cases} H^+(s) = \frac{U_{\alpha\beta}^+(s)}{U_{\alpha\beta}^-(s)} = \frac{k\omega_0(s + j\omega_0)}{s^2 + 2k\omega_0s + \omega_0^2} \\ H^-(s) = \frac{U_{\alpha\beta}^-(s)}{U_{\alpha\beta}^+(s)} = \frac{k\omega_0(s - j\omega_0)}{s^2 + 2k\omega_0s + \omega_0^2} \end{cases} \quad (9)$$

可以看出，SAI 正序分量提取模块的传递函数具有典型二阶系统的性质，系数 k 相当于阻尼系数。由二阶系统的特性可知， $k > 0.7071$ 时系统处于过阻尼状态，动态响应时间较长； $k < 0.7071$ 时系统处于

欠阻尼状态, 振荡周期较多, 因此选取 $k=0.7071$ 。图 6 为当 $\omega_0 = 100\pi \text{ rad/s}$ 时, 提取模块在不同 k 值下的阶跃响应曲线。在图中可以看出, 当 $k=0.7071$ 时, 系统的整体性能最优。

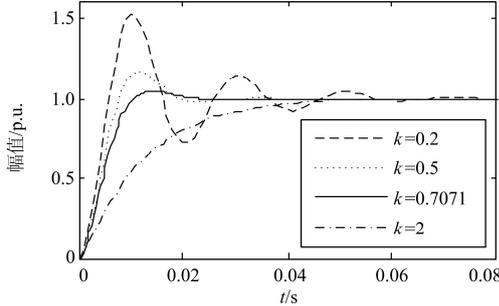


图 6 不同 k 值下双 SAI 正序分量提取模块的阶跃响应

Fig. 6 Step response with different values of k

3 频率自适应方法

在实际情况下, 电网的频率并不是保持恒定的, 而是会以工频为中心上下波动。为了避免频率偏移对正负序分量分离的影响, 应当加入一个反馈环节自适应调节 SAI(ω_0) 与 SAI($-\omega_0$) 的中心频率。反馈环节可以使用积分环节来实现, 其原理如图 7 所示。

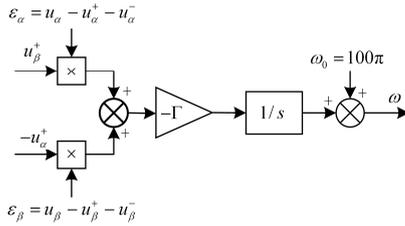


图 7 频率自适应环节

Fig. 7 Frequency auto-adaptive link

频率自适应环节的状态方程为

$$\dot{\omega} = \omega_0 - \Gamma(\varepsilon_\alpha u_\beta^+ - \varepsilon_\beta u_\alpha^+) \quad (10)$$

其中: Γ 为频率自适应增益; ε_α 与 ε_β 分别是 α 轴与 β 轴上电压误差; ω 为频率自适应环节的输出频率; $\omega_0 = 100\pi \text{ rad/s}$ 为前馈, 可以提高频率跟踪速度。

假设输入电压的频率为 ω' , 且 $\omega' \neq \omega$, 根据式 (9) 可得到 SAI 正序分量提取模块的输出偏差为

$$\begin{cases} \Delta|H^+(j\omega')| = \frac{k\omega(\omega + \omega')}{\sqrt{(\omega^2 + \omega'^2)^2 + (2k\omega\omega')^2}} \\ \Delta\angle H^+(j\omega') = \arctan \frac{\omega^2 - \omega'^2}{\omega\sqrt{(\omega^2 + \omega'^2)^2 + (2k\omega\omega')^2}} \end{cases} \quad (11)$$

式(10)可以改写为

$$\dot{\omega} = \omega_0 - \Gamma(U^+)^2 \Delta|H^+(j\omega')| \Delta\angle H^+(j\omega') \quad (12)$$

当 $\omega' > \omega$ 时 $\Delta\angle H^+(j\omega') < 0$, 通过调节可使 ω 增

大, 当 $\omega' < \omega$ 时 $\Delta\angle H^+(j\omega') > 0$, 通过调节可使 ω 减小, 这说明了图 7 所示结构可以对频率进行实时跟踪。使 SAI 正序分量提取模块实现频率自适应。

当 $\omega' \approx \omega$ 时, 式(12)舍去高阶项可近似为

$$\dot{\omega} = \frac{\Gamma(U^+)^2}{k\omega'}(\omega' - \omega) \quad (13)$$

其形式为一阶负反馈系统, 根据一阶系统设计原则, 可以得到频率自适应环节的动态调节时间如式(14)所示, 单位为秒。

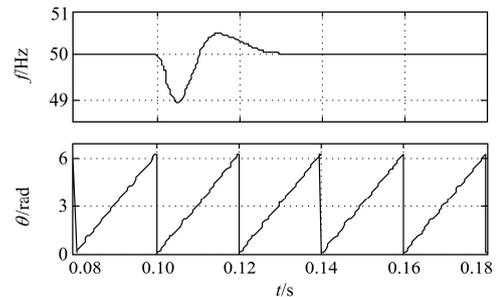
$$t_s = 4.6 \frac{k\omega'}{\Gamma(U^+)^2} \quad (14)$$

4 仿真对比与实验

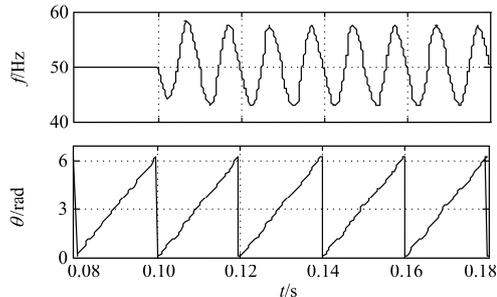
4.1 仿真对比

为了验证 DDSAI-PLL 的性能, 使用 Matlab/Simulink 搭建其仿真模型, 并在三相电压不平衡与频率偏移的情况下对 DDSAI-PLL 与 SRF-PLL 进行仿真对比。仿真中, 三相电压的幅值为 100 V, 频率为 50 Hz, DDSAI-PLL 中 SAI 反馈系数 $k=0.7071$, 频率自适应增益 $\Gamma=2$ 。

在 C 相电压跌落 50% 的情况下进行仿真对比, 其结果如图 8 所示。



(a) DDSAI-PLL 检测结果



(b) SRF-PLL 检测结果

图 8 C 相电压跌落 50% 仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform when phase C voltage drop 50%

在 A 相接地短路同时频率跃升 5% 的情况下进行仿真对比, 其结果如图 9 所示。

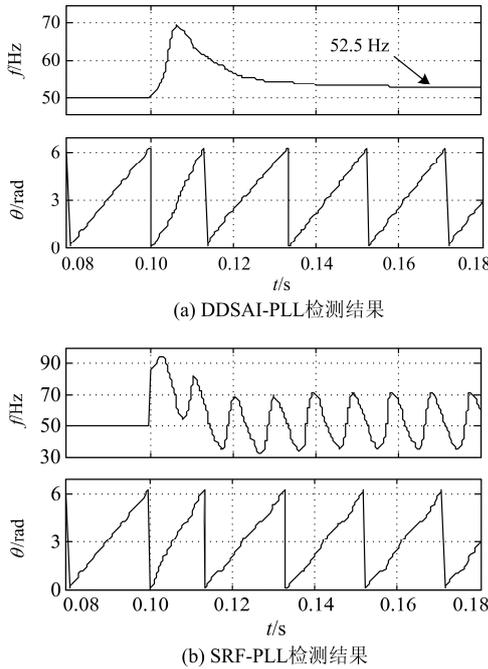


图 9 A 相接地短路同时频率跃升 5% 仿真波形
Fig. 9 Simulation waveform when phase A short to earth and the frequency jumped 5%

仿真验证中，设置所有的电压畸变都在 0.1 s 时发生；在仿真结果中，上图是锁相环检测到的频率信息，下图是检测到的相位信息。从图 8 中可以看出，C 相电压发生跌落后，DDSAI-PLL 在经过约 1 个工频周期的调整之后就能对基波正序的频率相位进行准确检测；而 SRF-PLL 受到负序分量的影响，检测的频率中含有 2 次分量，相位也出现相应的抖动，因此无法准确检测频率与相位信息。在图 9 中，当频率发生跳变时，DDSAI-PLL 经过约 2 个工频周期的调整，仍然可以实现对频率相位的准确估计。这说明 DDSAI-PLL 在三相电压不平衡与频率跳变的情况下都可以准确估计基波正序的频率与相位。

4.2 实验分析

为了进一步对本文锁相方法进行验证，搭建了基于 DSP TMS320F28335 实验验证平台，在 DSP 中对 DDSAI-PLL 进行数字实现，通过可编程电压源输出不平衡或是频率发生跳变的三相电压，使用 DSP 内置的 ADC 对电压进行采样，同时将三相电压与锁相结果使用 DAC7625 输出到示波器中进行观察。实验中工况的设置与仿真实验相同。

从图 10、图 11 中可以看出，实验结果与仿真结果相一致，进一步证明了 DDSAI-PLL 的有效性。

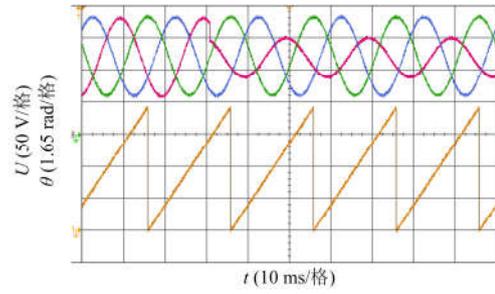


图 10 C 相电压跌落 50% 实验结果

Fig. 10 Experimental result when voltage of phase C drop 50%

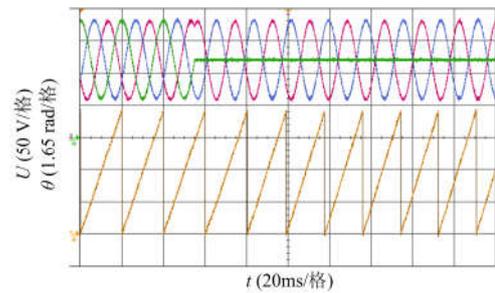


图 11 A 相接地短路同时频率跃升 5% 实验结果

Fig. 11 Experimental result when phase A short to earth and the frequency jumped 5%

5 结论

为了提高锁相环在电网电压不平衡条件下的快速性与准确性，本文设计了一种基于双正弦幅值积分器解耦的锁相环。该锁相环使用正弦幅值积分器交叉解耦的结构，同时引入了频率自适应环节。仿真与实验都证明，在电网电压不平衡及频率偏移的条件下，传统 SRF-PLL 受负序分量的影响，难以实现准确锁相。而 DDSAI-PLL 能够实现正负序分量的完全分离，并且对电网频率具有自适应能力，在电网电压不平衡及频率偏移的条件下，可以快速准确地跟踪基波正序的频率与相位。

参考文献

[1] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.

[2] 陈东明, 陈明亮, 谢桢, 等. 一种基于阈值开关与双环控制的新型锁相环[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 41-48.
CHEN Dongming, CHEN Mingliang, XIE Zhen, et al. A novel PLL based on threshold switch and dual-loop

- control technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 41-48.
- [3] 丁恒春, 杨晓波, 钱吉红, 等. 基于 dSPACE 的光伏并网系统实时仿真[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 21-26.
DING Hengchun, YANG Xiaobo, QIAN Jihong, et al. Real-time simulation of photovoltaic grid-connected system based on dSPACE[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(12): 21-26.
- [4] 杜佳玮, 杨鹏, 史旺旺. 考虑频率变化的基于 DFT 单相数字锁相环的椭圆拟合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 85-90.
DU Jiawei, YANG Peng, SHI Wangwang. A novel single-phase digital phase-locked loop based on DFT considering frequency variation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 85-90.
- [5] 丁雅琦, 古雯雯. 基于模块化多电平换流器的 DSTATCOM 控制策略仿真研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 67-71.
DING Yaqi, GU Wenwen. Simulation study on control strategies of dstatcom based on modular multilevel converter[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 67-71.
- [6] CHUNG S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.
- [7] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jinyu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58.
- [8] TONG L, ZOU X D, FENG S S, et al. An SRF-PLL-based sensorless vector control using the predictive deadbeat algorithm for the direct-driven permanent magnet synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(29): 2837-2849.
- [9] YOUNG K, DOUGAL R A. SRF-PLL with dynamic center frequency for improved phase detection[C] // International Conference on Clean Electrical Power, 2009: 212-216.
- [10] RODRÍGUEZ 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.
- [11] RODRIGUEZ P, LUNA A, CIOBOTARU M, et al. Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions[J]. Electrical Engineering/electronics Computer Communications & Information Technology Association, 2006: 5173-5178.
- [12] 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.
- [13] 陈国栋, 朱淼, 蔡旭, 等. 一种软件锁相环和电压跌落检测新算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4385-4394.
CHEN Guodong, ZHU Miao, CAI Xu, et al. A new algorithm for software phase locked-loop and voltage sag detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4385-4394.
- [14] 杜雄, 王国宁, 孙鹏菊, 等. 采用正弦幅值积分器的电网基波电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 104-111.
DU Xiong, WANG Guoning, SUN Pengju, et al. Synchronization signal detection for grid fundamental voltage through employing sinusoidal amplitude integrators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 104-111.
- [15] MARTIN K W. Complex signal processing is not - complex[C] // Solid-State Circuits Conference, 2003. ESSCIRC '03. Proceedings of the 29th European. 2003: 3-14.
- [16] 刘延东. 基于正弦幅值积分器的单同步坐标系同步信号提取策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 17-21.
LIU Yandong. Estimation of synchronization signal using sinusoidal amplitude integrators in synchronous reference frame[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 17-21.

收稿日期: 2016-05-09; 修回日期: 2016-06-17

作者简介:

徐青青(1985-), 女, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为工业自动化、电力电子技术; E-mail: 840230275@qq.com

陈莹(1982-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向为机电一体化;

刘莉(1977-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向为机电控制。

(编辑 葛艳娜)