

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201090

基于改进型环路滤波器的单相锁相环

张振波^{1,2}, 王海云^{1,2}, 王维庆^{1,2}, 刘启德^{1,2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 教育部可再生能源发电与
并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对单相锁相环(Phase-lock Loop, PLL)受PI控制器饱和抑制造成滤波性能不足这一问题, 提出了一种基于改进型环路滤波器的单相锁相环。该锁相环通过增加抗饱和PI控制器, 改进环路滤波器, 提高滤波性能。在输入同时含有直流和谐波干扰情况下, 对电网实时相位进行锁相跟踪, 可以明显提高锁相精度。利用Matlab/Simulink平台对改进型单相锁相环在电网畸变时的适应性、抗干扰性进行仿真分析。并基于TMS320F28335 DSP芯片为核心的实验平台进行实验验证, 结果表明, 该方法能快速准确地跟踪系统频率变化, 达到锁相效果。

关键词: 单相锁相环; 环路滤波器; 抗饱和控制器; DSP

Single phase locked loop based on improved loop filter

ZHANG Zhenbo^{1,2}, WANG Haiyun^{1,2}, WANG Weiqing^{1,2}, LIU Qide^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Engineering Research Center for Renewable Energy Generation and Grid Control, Urumqi 830047, China)

Abstract: The filtering performance of a Phase-Lock Loop (PLL) is insufficient because of the saturation suppression of PI controller. Thus a single-phase PLL based on an improved loop filter is proposed. The PLL improves the loop filter and the filter performance by adding an anti-saturation PI controller. Where the input contains both DC and harmonic interference, the phase-locking precision can be clearly improved by tracking the real-time phase of the power grid. Matlab/Simulink platform is used to simulate and analyze the adaptability and anti-interference of the improved single-phase PLL when the power grid is distorted. Experimental verification is conducted based on the experimental platform with the TMS320F28335 DSP development board as the core. The results show that this method can quickly and accurately track the frequency change of the system and achieve the phase-locking effect.

This work is supported by the Natural Science Foundation of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2020D01C068).

Key words: single-phase PLL; loop filter; anti-saturation controller; DSP

0 引言

在当今化石能源短缺的背景下, 随着分布式可再生能源发电、微电网、储能装置的快速发展, 以单相并网逆变器、变频器, 单相储能变流器为代表的电力电子设备得到广泛使用。大量的电力电子设备接入, 造成了并网电能质量下降, 进一步影响了

分布式电源自身的系统稳定性。因此通过采用单相锁相环技术来使接入系统电压与电网电压同步, 利用其具有实时监测电网频率变化、相角突变、谐波影响等特点^[1-2], 对电网电压频率、相位进行跟踪, 提高并网稳定性。

目前, 常用的实现单相锁相环的方法主要有两种: 一种是基于过零比较法; 另一种是基于瞬时无功理论方法^[3]。前者由于只有在一个电网周期结束时, 才能调整相位信息, 所以在电网出现波动和畸变时, 不能准确捕捉到相位信息, 无法满足实时性。后者由于锁相结构简单, 动态性能好, 易于实现而被广泛应用。基于瞬时无功理论的单相锁相环是通

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2020D01C068); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目资助(2020B02001); 新疆维吾尔自治区高校重大项目资助(XJEDU20171002)

过三相锁相环改进而来的。对于三相锁相环，输入量中任意时刻同时含有 U_a 、 U_b 、 U_c 三相电压，其包含幅值、相位、频率信息。先通过 Clark 变换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中，再通过 Park 变换到旋转坐标系下，得到 d 轴的幅值信号和 q 轴的相位信号，最后经过相应控制调节得到锁相相位^[4-5]。不同于三相锁相环，单相锁相环由于只有单相输入电压，在进行坐标变换时，缺少一个参考量，所以需要构造两相虚拟的正交信号来实现坐标变换。常用的构造正交信号的方法主要有：延时法构造正交向量^[6]、微分环节构造正交向量^[7]，这两种方法在电压谐波较大时，会在零点附近产生波动，造成正交信号失真，导致锁相失败。Park 反变换构造正交信号^[8-9]，这种方法存在滤波延迟的缺点，会造成频率跟踪移相。目前广泛使用的是用广义二阶积分器构造正交信号(Second Order Generalized Integrator for OSG, SOGI-OSG)^[10-13]，该方法实现简单，可以获得无延迟的虚拟正交信号。

上述产生正交信号的方法基本上没有滤波效果，尤其是在电网中含有低次谐波时，会因无法有效滤除而导致锁相失败。针对这一问题，文献[14]提出一种延时信号消除滤波方法(Dealyed Signal Cancellation, DSC)，通过延时滤波器，采样延时前后的电压信息，通过运算消除谐波，但该方法需要进行两次采样，且含有多个延时环节，运算复杂、响应速度较慢。文献[15]提出滑动平均滤波器，当其窗宽合适时，可以看作理想低通滤波器，在任意次数谐波情况下，提取出基波相位，实现滤波效果，但当频率变化时会产生锁相误差。文献[16-17]提到，采用 SOGI 正交发生器构造正交信号时，其自身也具有一定滤波能力，但受到增益系数 k 影响，会降低系统动态特性，为了保证响应速度，只能牺牲滤波效果。文献[18]提出采用卡尔曼滤波来消除含有的谐波，通过求解状态方程和量测方程，将非线性谐波转化为线性求解，但该方法有一定局限性，只适用于消除稳态运行系统中的谐波。

针对上述研究现状，本文提出一种改进型环路滤波器的单项锁相环，通过增加抗饱和 PI 控制器，提高了 PI 滤波范围，不需要在锁相环中单独增加滤波器，有效加快了响应速度，简化了锁相环结构。同时可以在电网电压畸变、直流偏移、谐波干扰多种工况下实现锁相跟踪。实验结果表明：改进型锁相环精度高、响应速度快、抗干扰性强。

1 单相锁相环原理

单相锁相环通常是由四部分组成^[19]：正交信号

发生器(Orthogonal Signal Generator, OSG)、鉴相器(Phase Detector, PD)、环路滤波器(Loop Filter, LF)和压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)。其原理框图如图 1 所示。

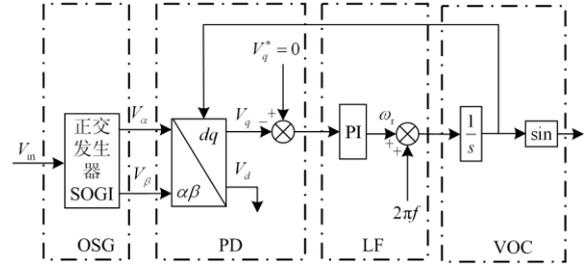


图 1 传统单相锁相环原理图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional single-phase PLL

将采集的单相电压信号输入到正交发生器(SOGI)中，通过虚拟正交分解得到两个正交的正弦信号 V_α 、 V_β 。假设输入电压信号为 $V_m = V_m \sin \theta$ ，则 V_α 和 V_β 表示为

$$\begin{cases} V_\alpha = V_m \sin \theta^* \\ V_\beta = V_m \sin(\theta^* - 90^\circ) = V_m \cos \theta^* \end{cases} \quad (1)$$

式中： θ^* 为输入电压信号的实际相位； V_m 为输入电压信号。

正交分解得到的两个正弦信号 V_α 和 V_β 包含输入电压信号的相位、幅值和频率信息^[20]，再通过 Park 变换得到相位信息。其变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin \theta \sin \theta^* + V_m \cos \theta \cos \theta^* \\ V_m \sin \theta^* \cos \theta - V_m \cos \theta^* \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)整理可得：

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta^* - \theta) \\ V_m \sin(\theta^* - \theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过 Park 同步旋转坐标变换得到的控制系统中， d 轴为幅值信号分量， q 轴为相位信号分量。

通过电压 V_q 的大小表示，实际相位 θ^* 和锁相环相位 θ 的差值 $\Delta\theta$ 。当 $V_q = 0$ 时，则表明电网电压相位与锁相相位相同，即 $\theta^* = \theta$ ，此时锁相环相位跟随上了电网电压相位，实现了相位锁定。当 $V_q \neq 0$ 时，即 $\theta^* \neq \theta$ ，其误差大小 $\Delta\theta$ ，决定了 V_q 的值，此时锁相环通过 PI 调节，控制输出相位 θ 与电网相位 θ^* 一致，同时输出角频率误差 ω_i ，将电网参考角

频率引入, 加快响应速度, 同时对角频率进行修正, 最后通过积分环节, 得到锁相环瞬时相位, 实现相位的跟踪锁定。

但传统锁相环对电网电压同时含有直流分量、谐波分量时, 受 PI 控制器饱和系数影响, 不能完全滤除直流分量和谐波分量, 造成锁相结果出现误差, 严重的会造成锁相失败。针对于这一问题, 提出了改进型单向锁相环。

2 改进型单相锁相环

改进型单相锁相环通过给环路滤波器中的 PI 控制加装非线性饱和度模块, 加强环路滤波能力, 提高锁相精度和锁相速度。改进后的单相锁相环原理如图 2 所示。

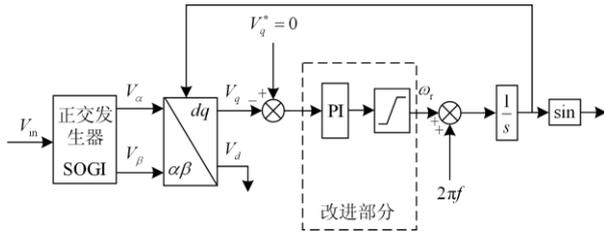


图 2 改进型单相锁相环原理图

Fig. 2 Schematic diagram of improved single-phase PLL

根据图 2 可得单相锁相环的闭环传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{V_q k_p s + V_q k_i}{s^2 + V_q k_p s + V_q k_i} \quad (5)$$

式中, k_p 、 k_i 为 PI 控制器的两个参数, 见式(16)。

$$\begin{cases} k_i = \frac{2\omega_n^2}{V_q} \\ k_p = \frac{4\xi^2 k_i}{2V_q} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_n 表示自然振荡频率; ξ 表示阻尼系数。

PI 控制器本质上是一个滤波器, 具有消除稳态误差滤波的作用^[21]。在单相锁相环中由于正交分解时二阶积分器会产生谐振, 同时由于存在非线性负载和直流分量, 所以分解变换得到的 V_q 会含有 2、6 次谐波^[22-24]。谐波造成系统向一个方向产生偏差, 通过 PI 控制器的积分作用, 输出不断累加, 超调量加大, 从而导致数据的运算执行达到极限位置, 响应速度变慢, 直到输出控制量超出了运算范围而进入饱和区。当系统产生的偏差反向时, 控制量逐渐退出饱和区。进入饱和区时间越长则从饱和区退出所需的时间就越长。由于处在恢复时间段, 所以 PI 控制器在这段时间内不能随偏差的反向立即做出相应的改变, 这时系统就像失去控制一样, 造成系统

稳定性、响应速度下降, 导致 PI 滤波功能受到限制。非线性饱和度模块, 通过内部比较逻辑, 对 PI 控制器进行积分分离算法, 通过输入信号当前值与设定饱和值比较, 当前值大于饱和值时, 模块则累加负误差; 反之则累加正误差。有效解决了饱和问题, 有效扩大了 PI 的滤波范围, 同时起到了收敛信号, 降低增益, 提高稳定性的作用。非线性饱和和 PI 控制模块原理, 如图 3 所示。

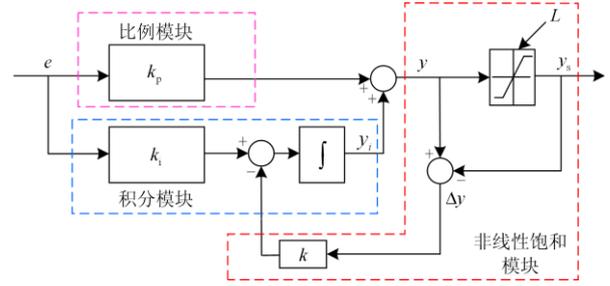


图 3 非线性饱和 PI 控制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of nonlinear saturated PI control

根据图 3 可得 PI 输出 $y_s(t)$ 表达式为

$$y_s(t) = k_p e(t) + k_i \int [e(t) - k(y(t) - L)] dt \quad (7)$$

式中, L 为饱和度模块的最高值, 等于 y_s , PI 输入量 $e(t)$ 引起的输出量变化 $y_s(t)$ 表示为式(8)。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_s(t) = \frac{E}{k} + L \quad (8)$$

式中, E 为常数误差。如果 $e(t)$ 为斜率为 A 的线性方程, 由式(7)可得一阶微分方程为

$$\frac{dy_s(t)}{dt} + k_i k y(t) = A(k_p + k_i t) + k_i E + k_i k L \quad (9)$$

由式(9)可得其通解为

$$y_s(t) = \frac{A}{k k_i} \left(k_p - \frac{1}{k} + k_i t \right) + k e^{-k_i t} + y(0) \quad (10)$$

由式(10)可知, 通过改变系数 k 的大小可以调节积分器饱和限制能力, k 越大, $y_s(t)$ 越小, 积分器退出饱和和能力越强, 速度越快, 反之则越弱越慢, 一般情况下, k 的取值范围为 $1 < k < 5$ 。若 $k < 1$, 则要经过多次反馈进行积分削弱, 动态响应速度变慢; 若 $k > 5$, 则可能导致削弱过大, 从而进入反向饱和状态, 在正向饱和与反向饱和状态交替变换, 造成陷入循环饱和的状态。因此通过设定适当的系数进行积分削弱, 可以显著提高 PI 滤波的能力, 提高锁相环抗干扰性, 加强其动态响应速度。

如图 3 所示, 当输出未达到饱和状态时, 有 $y = y_s$, 此时 $\Delta y = y - y_s = 0$, 所以不会对积分器产生影响。当 PI 控制器产生饱和时, 则有 $|y| > L$, 假设发生正向饱和, 此时 $y > y_s$, 则有 $\Delta y = y - y_s > 0$ 。

由图 3 可知,将饱和和误差 Δy 与 k 乘积后反馈给积分模块,反馈后的 $y_i(t)$ 表示为

$$y_i(t) = k_i \int e(t) - k \Delta y dt \quad (11)$$

由式(11)可知,当 PI 控制器在第一次达到饱和状态后,就会产生饱和误差 Δy ,并通过负反馈给积分模块进行削弱,因此控制器立即处于退饱和状态,由于进入饱和状态时间短暂,没有经过多次连续积分,所以控制器仍然能进行工作,快速对偏差做出相应改变。控制器每次进行积分前都会进行一次饱和和误差计算,所以一旦达到饱和,系统立即对积分进行了削弱,减小其超调幅度,快速达到退出饱和状态,恢复时间迅速,系统控制稳定,不会造成系统失控。

3 仿真结果分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台下,对改进后的单相锁相环分别在电压频率、相位、幅值突变,直流分量、谐波分量同时注入情况下,对其进行仿真验证。

3.1 电网畸变锁相验证

仿真设定,电网输入电压幅值为 100 V,频率为 50 Hz,初始相位为 0 rad。为了方便观察锁相相位与输入电压的关系,仿真时,将锁相相位扩大 10 倍。当电网电压频率发生突变时,锁相环仿真结果如图 4 所示。当 $t=0.03$ s 时,电压频率突变,由 50 Hz 突变为 53 Hz,通过仿真图可以看出,经过大约 0.06 s 后,锁相环跟踪上电网相位,输出电压波形如图 4(a)所示。图 4(b)为锁相环相位与电网电压波形结果。图 4(c)为传统的单相锁相环(Original Phase-Locked Loop, O-PLL)和改进后的单相锁相环(Modification Phase-Locked Loop, M-PLL)在锁相相位的误差大小。通过对比可以看出,改进后的单相

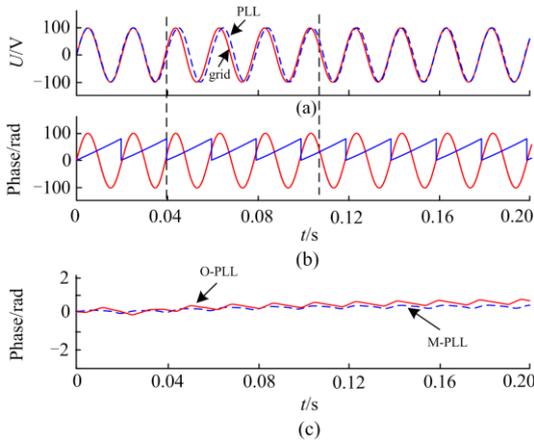


图 4 电压频率突变锁相环仿真结果

Fig. 4 Simulation results of PLL with voltage frequency mutation

锁相环相位误差较小,趋于平稳;传统的单相锁相环误差略大,稍有波动。

图 5 为电压相位突变时,锁相环仿真结果。同样,当 $t=0.03$ s 时,相位突变 90° ,锁相环经过 0.06 s 后,输出波形与电网保持一致。在误差方面,改进后的锁相环在相位跃变时,锁相误差依然较小,略优于传统锁相环,见图 5(c)。

电压幅值突变时,锁相仿真结果如图 6 所示,可以看出电网幅值突变对相位的影响不是很明显,短时间内就可以完成精准锁相。改进后的锁相环在误差方面和传统锁相环相差不大,基本相同,如图 6(c)所示。

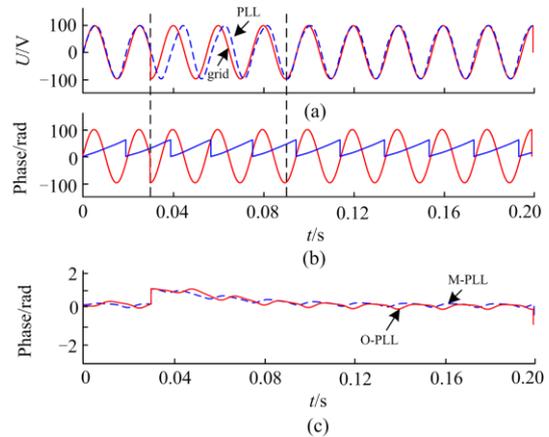


图 5 电压相位突变锁相环仿真结果

Fig. 5 Simulation results of PLL with voltage phase mutation

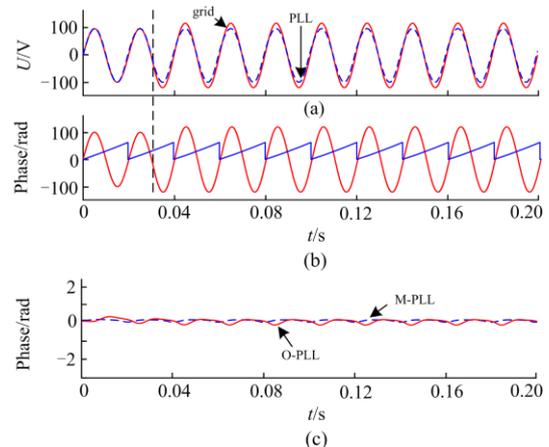


图 6 电压幅值突变锁相环仿真结果

Fig. 6 Simulation results of PLL with voltage amplitude mutation

3.2 电网同时注入直流、谐波量锁相验证

仿真设定,当 $t=0.03$ s 时,电网同时注入 20% 的 5 次谐波,10% 的直流分量,仿真结果如图 7 所示。传统的单相锁相环在同时注入直流和谐波分量大约 0.03 s 后,其锁相输出电压波形与电网电压出

现偏移, 偏移量越来越大, 最终导致锁相失败。改进后的单相锁相环在注入直流和谐波分量后, 依旧能跟踪上电网电压与相位, 锁相成功。如图 8 所示, 传统单相锁相环与改进后单相锁相环误差对比, 可以明显看出: 传统单相锁相环在直流量和谐波的干扰下, 其相位误差较大, 且具有一定波动性; 改进的单相锁相环相位误差趋近于零, 明显小于传统锁相环, 波动性小, 较为稳定。由此可以看出本文提出的单相锁相环在电网直流谐波分量干扰时, 效果明显优于传统单相锁相环。

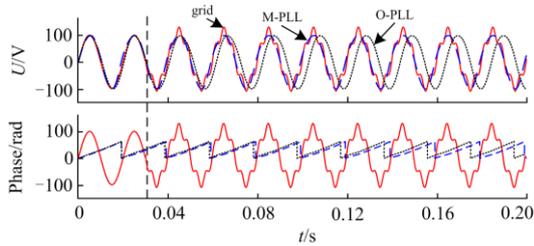


图 7 含有直流和谐波的干扰锁相结果

Fig. 7 Phase-locked interference results with DC and harmonics

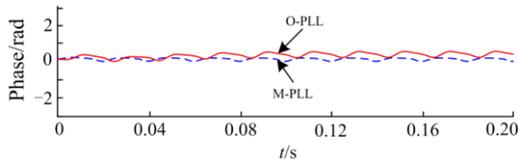


图 8 改进前后锁相误差对比

Fig. 8 Comparison results of phase-locking errors before and after improvement

通过以上分析比较, 可以看出, 改进型环路滤波器的单相锁相环不仅在电网电压相位、幅值、频率发生畸变时, 锁相结果略优于传统单相锁相环, 实现跟踪效果, 并且在电网同时含有直流和谐波的扰动下, 依然能够达到理想的锁相精度。由此说明其具有优异的适应性能和良好的动态性能。

4 实验结果分析

本文实验基于 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 开发板进行验证。实验采用两块 DSP 开发板, 其中一块通过编译来模拟电源, 并通过其按键改变频率、相位、幅值, 模拟输入直流谐波干扰。另一块编译锁相环, 并将结果通过示波器显示, 对其锁相结果进行验证, 得出实验结果图。

图 9 为电网电压频率突变时的实验结果, 实验结果表明, 输入电压频率由 50 Hz 突变到 53 Hz, 经过约 0.06 s 后, 跟踪上输入电压, 完成锁相过程, 与仿真结果一致。

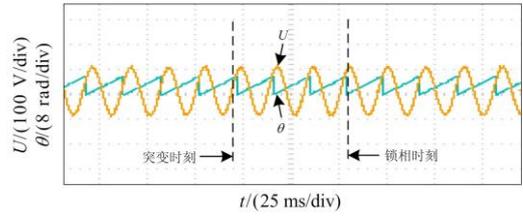


图 9 电网电压频率突变的实验图

Fig. 9 Experimental diagram of grid voltage frequency mutation

电网电压相位突变实验结果如图 10 所示, 输入电压相位突变 90° , 由于突变较大, 锁相时间稍长, 在经过约 0.1 s 后, 完成锁相调整, 证明改进后的锁相环在突变较大时, 适应性能优越。

图 11 为电网电压幅值突变时的实验结果, 由实验结果可以看出, 输入电压幅值由 100 V 突变到 200 V, 经过约 0.025 s 的锁相调整, 能够跟踪上输入的电压相位, 验证了仿真结果。

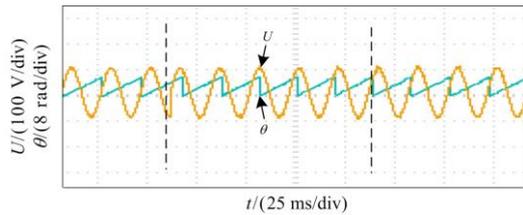


图 10 电网电压相位突变实验图

Fig. 10 Experimental diagram of grid voltage phase mutation

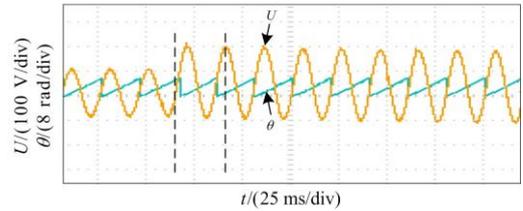


图 11 电网电压幅值突变实验图

Fig. 11 Experimental diagram of grid voltage amplitude mutation

图 12 为电网电压含有谐波和直流分量时的实验结果, 结果显示, 当输入电压含有 20% 的 5 次谐波和 10% 的直流分量时, 经过约 0.05 s, 完成锁相

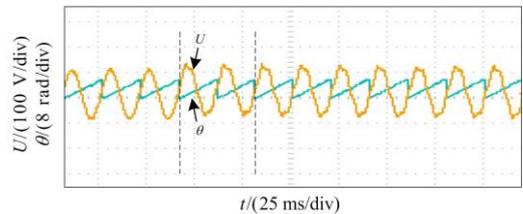


图 12 含有直流谐波干扰的实验图

Fig. 12 Experimental diagram with DC and harmonic interference

过程。证明改进后的锁相环在直流谐波干扰的情况下能够实现精准锁相。

综合上述实验结果分析可以看出,改进后的单相锁相环,在电网电压发生畸变时能准确快速地完成锁相,在出现直流谐波干扰时,也能精准锁相,抗干扰性强,能很好应用于实际工程中。

5 结论

本文提出的改进型环路滤波器单相锁相环,通过改进 PI 控制器,提升其滤波范围,解决了传统锁相环中的 PI 控制器受参数抑制,而无法在同时含有谐波和直流干扰情况下进行精准锁相的问题。同时改进后的单相锁相环在面对电网畸变时,也能快速准确地实现跟踪效果,其结构简单,运算量小,方便 DSP 的实现。本文通过仿真和实验验证了该锁相环的优异动态性能和适应性能,在以后的新能源并网中有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 赵新, 金新民, 杨捷, 等. 并网逆变器新型不平衡控制方案[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 257-265.
ZHAO Xin, JIN Xinmin, YANG Jie, et al. New unbalanced control scheme for grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 257-265.
- [2] LIAO H, CHEN Y. A novel phase-locked loop for three-phase ups under distorted utility conditions[C] // International Conference on Electric Information and Control Engineering, April 15-17, 2011, Wuhan, China: 1076-1080.
- [3] 陈顺, 黄守道, 王德强, 等. 基于改进瞬时无功理论的单相锁相环[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 89-90.
CHEN Shun, HUANG Shoudao, WANG Deqiang, et al. Single-phase phase-locked loop based on modified instantaneous reactive power theory[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 89-90.
- [4] 杜平, 万玉良, 项颂, 等. VSC 变流器与弱电网交互作用的次同步振荡关键参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 44-49.
DU Ping, WAN Yuliang, XIANG Song, et al. Study on key parameters of subsynchronous oscillation between VSC converter and weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 44-49.
- [5] HAIDER S, LI Guojie, WANG Keyou. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [6] 李胜, 袁小明, 黄晨辉. 基于交叉耦合锁相环的多频带滤波器: 一种检测系统多时间尺度振荡的自适应滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5282-5291.
LI Sheng, YUAN Xiaoming, HUANG Chenhui. Multi-band filter based on cross-coupled phase-locked loop: an adaptive filter for detecting system multi-time-scale oscillations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5282-5291.
- [7] 关清心, 张宇, 李民英, 等. 基于微分环节的单相锁相环方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5318-5325.
GUAN Qingxin, ZHANG Yu, LI Mingying, et al. Single-phase phase-locked loop based on differentiator units[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5318-5325.
- [8] SILVA S M, LOPES B M, FILHO B J C, et al. Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems[C] // Proceedings of the Industry Applications Conference 2004 (IAS'04), 39th IAS Annual Meeting, October 3-7, 2004, Seattle, WA, USA: 2259-2263.
- [9] 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.
- [10] 胡雪凯, 张乾, 胡文平, 等. 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 75-82.
HU Xuekai, ZHANG Qian, HU Wenping, et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic on automatic reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 75-82.
- [11] 余永奎, 李华, 刘俊峰. 基于固定频率二阶广义积分器的单相锁频环[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 86-93.
YU Yongkui, LI Hua, LIU Junfeng. Single-phase frequency-locked loop based on fixed-frequency second-order generalized integrator[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(9): 86-93.
- [12] 杨才伟, 王剑, 游小杰, 等. 二阶广义积分器锁频环数字实现准确性对比[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2584-2596.
YANG Caiwei, WANG Jian, YOU Xiaojie, et al. Accuracy comparison of digital implementation on the second-order generalized integrator frequency-locked

- loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2584-2596.
- [13] 陈辉. 基于双二阶广义积分器的软件锁相环在分布式并网光伏逆变器中的应用[J]. 自动化应用, 2018(7): 97-100, 119.
CHEN Hui. Application of software phase-locked loop based on double second-order generalized integrator in distributed grid-connected photovoltaic inverter[J]. Automation Application, 2018(7): 97-100, 119.
- [14] 杨旭红, 吴斌, 孙克帅, 等. 一种频率自适应延迟周期法的锁相环研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(2): 96-101.
YANG Xuhong, WU Bin, SUN Keshuai, et al. Frequency adaptive phase-locked loop based on delayed signal cancellation[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(2): 96-101.
- [15] 吕广强, 纪海平, 李嘉, 等. 一种基于双滑动平均滤波器的单相软件锁相环[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 151-157.
LÜ Guangqiang, JI Haiping, LI Jia, et al. A single-phase software phase-locked loop based on double moving average filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 151-157.
- [16] 张树楠, 罗海云, 程晓绚, 等. 基于双 dq 变换正负序提取及锁相环的 FPGA 实现[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 182-189.
ZHANG Shunan, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Realization of positive & negative sequence component picking up and phase locked loop using FPGA based on dual-dq transform[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 182-189.
- [17] 陈荣, 刘超. 基于改进型二阶广义积分器的单相锁相环设计[J]. 自动化仪表, 2020, 41(4): 51-55.
CHEN Rong, LIU Chao. Design of single-phase phase-locked loop based on improved second-order generalized integrator[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(4): 51-55.
- [18] 欧阳森, 马文杰, 柯清派, 等. 基于反 Park 变换的不平衡锁相环设计研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 1-5, 12.
OUYANG Sen, MA Wenjie, KE Qingpai, et al. Design of unbalanced phase-locked loop based on inverse Park transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 1-5, 12.
- [19] 王子民, 汪娟娟, 傅闯, 等. 基于单相锁相环的高压直流分相触发相位控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 160-168.
WANG Zimin, WANG Juanjuan, FU Chuang, et al. Individual phase control of high voltage direct current based on single-phase locked loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 160-168.
- [20] 孙士杰, 闫海城. 基于新型二阶广义积分器的单相锁相环设计[J]. 电力电子技术, 2017, 51(3): 111-113.
SUN Shijie, YAN Haicheng. A single-phase phase-locked loop structure based on new second-order generalized integrator[J]. Power Electronics, 2017, 51(3): 111-113.
- [21] 朱建红, 黄琼, 孟棒棒. 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波直接解耦风电并网锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 135-141.
ZHU Jianhong, HUANG Qiong, MENG Bangbang. Direct decoupling wind power grid-connected phase-locked loop design based on $\alpha\beta$ component filtering[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 135-141.
- [22] 陶兴华, 李永东, 孙敏, 等. 一种基于同步旋转坐标变换的单相锁相环新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 147-152.
TAO Xinghua, LI Yongdong, SUN Min, et al. A novel single-phase locked loop algorithm based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 147-152.
- [23] 文武松, 张颖超, 王璐, 等. 解耦双同步坐标系下单相锁相环技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 114-120.
WEN Wusong, ZHANG Yingchao, WANG Lu, et al. Phase-locked loop technology for single-phase system in decoupled double synchronous reference frame[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 114-120.
- [24] 王佳浩, 潘欢, 纳春宁. 电网电压不平衡和谐波畸变下新型并网锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 108-115.
WANG Jiahao, PAN Huan, NA Chunping. A new grid-connected phase-locked loop design under grid voltage imbalance and harmonic distortion conditions[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 108-115.

收稿日期: 2020-09-06; 修回日期: 2020-11-29

作者简介:

张振波(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电与并网技术; E-mail: 1471551541@qq.com

王海云(1973—), 女, 通信作者, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术; E-mail: 327028229@qq.com

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统自动化和风电机组智能控制。E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 葛艳娜)