

基于改进二阶广义积分锁相的LVRT控制策略

在面对三相电网电压跌落、频率突变等复杂工况时，锁相环（PLL）的准确度与动态响应是光伏并网逆变器的重要性能指标。针对传统双二阶广义积分锁相环（DSOGI-PLL）中SOGI单元在电网频率突变时容易导致锁相准确度降低的问题，引入了一种补偿改进算法。仿真及试验表明，该系统可以更好地滤除电网谐波，快速、精确地锁定相位，在电压跌落时保护逆变器穿越故障，具有很强的电网适应性。

雷红玲/广东机电职业技术学院 杨 畅 李建飞/上能电气股份有限公司
谢运祥/华南理工大学电力学院

0 引言

近年来，可再生能源发电系统蓬勃发展，电站规模不断扩大，市场逐渐成熟化^[1]。但同时，大量的装置和设备并入电网后降低了电网的稳定性。电网故障时，锁相环准确度尤为重要。在电网同步信号提取技术中，基于同步参考坐标系锁相环（SRF-PLL）结构简单，具有良好的动态性能，但电网电压畸变时，无法准确检测出同步信号，影响并网系统的稳定性^[2]。基于双二阶广义积分器锁相环（DSOGI-PLL）在电网故障产生不对称分量和低次谐波时，能准确地提取电压同步信号，现已在工程中广泛使用^[3-4]。但是DSOGI-PLL中的二阶广义积分器（SOGI）单元采用频率自适应的方式工作，即输入的频率信号来自于后级锁相环输出的频率反馈量，使锁相系统较为复杂。且当电网频率发生跳变时，SOGI单元的两个输入信号中均含有扰动量，易使输出信号波动，进而影响

了DSOGI-PLL锁相效果，降低系统的稳定性^[5]。

本文针对电网故障情况，分析了不平衡电压及频率变化产生的原因，基于传统SOGI单元输出波动的缺点提出一种改进方法，通过固定输入角频率和增加补偿项保证输出信号的稳定。最后通过低压穿越（LVRT）试验验证改进后系统的可靠性。

1 电网电压不平衡故障状态分析

对于三相三线制逆变器系统，当电网发生三相不平衡电压跌落时，可忽略零序分量，电压可以表示为正序和负序分量之和

$$u_i = U_p \cos\left(\omega t + \phi_p - k_i \frac{2\pi}{3}\right) + U_n \cos\left(-\omega t + \phi_n - k_i \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1)$$

式中，当 $i = a, b, c$ 时， $k_i = 0, 1, 2$ ； U_p 、 U_n 、 ϕ_p 和 ϕ_n 分别为基波正、负序分量幅值及初始相位角； ω 为电网基波角频率。

锁相环正常工作时，电压正序分量的相位角等于旋转坐标轴的旋转角度，即 $\theta_p = \omega t + \phi_p$ ，对三相电网电压进行Clark和Park变换后可得

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = U_p \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + U_n \begin{pmatrix} \cos(-2\omega t + \phi_n - \theta_p) \\ \sin(-2\omega t + \phi_n - \theta_p) \end{pmatrix} \quad (2)$$

即当电网电压不对称时，通过Clark和Park变换，可将电网电压基波正、负序分量分别转换为 dq 轴直流量和二倍工频的交流分量。正是这个二倍工频分量，使得SRF-PLL在电网非对称跌落时会产生二倍频振荡。



雷红玲/讲师

关键词/Keywords

锁相环 ·
二阶广义积分器 ·
低压穿越 ·

南方电网科技项目（GDKJXM00000015）。

2 基于双二阶广义积分器的锁相方案

在工程中常用双二阶广义积分器 (DSOGI-PLL) 构造的锁相环作为闭环策略, 它能抑制电网不平衡故障下的二次谐波, 同时具有较高的稳定性。

根据对称分量法, 即

$$\mathbf{v}_{abc}^+ = [\mathbf{v}_a^+ \quad \mathbf{v}_b^+ \quad \mathbf{v}_c^+]^T = [\mathbf{T}_+] \mathbf{v}_{abc} \quad (3)$$

根据Clark和Park变换可推导出

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\alpha\beta}^+ &= [\mathbf{T}_{\alpha\beta}] \mathbf{v}_{abc}^+ = [\mathbf{T}_{\alpha\beta}] [\mathbf{T}_+] \mathbf{v}_{abc} \\ &= [\mathbf{T}_{\alpha\beta}] [\mathbf{T}_+] [\mathbf{T}_{\alpha\beta}]^{-1} \mathbf{v}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{pmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, q 为 90° 的移相因子。

从式 (4) 中可以看出, 通过对 $\alpha\beta$ 旋转坐标系下的电网电压进行 90° 移相可以得到原电网电压的正序分量。SOGI 可以产生两相正交信号, 输出的两路信号相差 90° , 其结构示意图如图 1 所示。

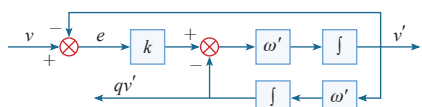


图1 SOGI结构图

根据图 1 可以得到 SOGI 系统的闭环传递函数, 即

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (5)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (6)$$

设输入信号 v 是幅值为 1、角频率为 ω 的标准正弦曲线。根据式 (5)、式 (6) 可以得到系统的幅频特性和相频特性, 即

$$v' = Dv \begin{cases} |D| = \frac{k\omega\omega'}{\sqrt{(k\omega\omega')^2 + (\omega^2 - \omega'^2)^2}} \\ \angle D = \tan^{-1} \left(\frac{\omega'^2 - \omega^2}{k\omega\omega'} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$qv' = Qv \begin{cases} |Q| = \frac{\omega'}{\omega} |D| \\ \angle Q = \angle D - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8)$$

在稳态时 $\omega' = \omega$, 此时 $D(s)$ 、 $Q(s)$ 的幅频特性均为 1, 相频特性相差 90° , 此时 SOGI 输出一对与输入信号幅值相同的正交量, 且 $v' = v$ 。

得到正交信号后代入式 (4) 即可得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的电网电压正序分量, 经过 Park 变换得到 dq 轴分量, 此时 u_d 、 u_q 不含二倍频分量, 采用传统的锁相方式, 即控制无功分量 $u_q = 0$, 使锁相环输出相位角 θ 等于电网电压相位角 ωt , 具体实现过程如图 2 所示。

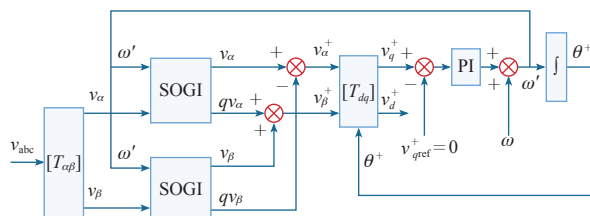


图2 DSOGI-PLL结构图

3 二阶广义积分器改进方案

当电网电压频率变化时, 锁相环输出的角频率 ω' 也处于振荡状态, 若仍以 ω' 作为 SOGI 的输入角频率, 则其两路输入信号中均含有扰动量, 这样会影响 $D(s)$ 和 $Q(s)$ 的幅值和相位, 从而影响锁相环的锁相准确度。

由式 (8) 可知, 当 $\omega' = \omega$ 时, $|Q| = |D|$ 。稳态时电网电压为工频 $f_0 = \omega_0/2\pi = 50$ Hz。在此, 将锁相环输出的角频率 ω' 设置为直接由工频电网电压角频率 ω_0 给定, 并在 qv' 信号输出侧补偿一个 ω'/ω_0 项, 其中, ω' 为当前电网电压频率。具体改进如图 3 所示。

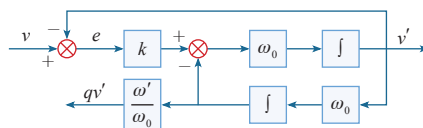


图3 改进SOGI结构图

改进后, SOGI 系统的伯德图如图 4 所示。图 4 中, $D(s)$ 为带通滤波器, $Q(s)$ 为低通滤波器。当 $k > 1$ 时, $Q(s)$ 在 $f < 50$ Hz 处的幅频特性大于 1, 说明此时系统对低频噪声有放大功能。k 值越小, 滤波器频率分辨率越好, 但系统响应速度越慢。传统 SOGI 取 $k = \sqrt{2}$, 此处取 $k = 0.9$ 。

当电网稳定时 $\omega'/\omega_0 = 2 \times 50\pi$, 由伯德图可以看出, 系统在 50 Hz 处 $D(s)$ 和 $Q(s)$ 的幅值衰减均为

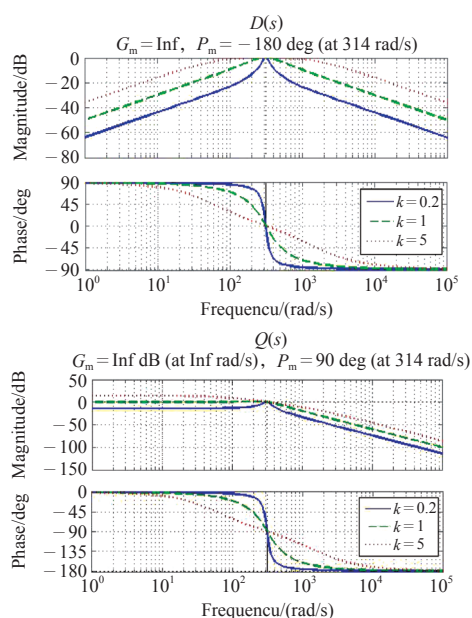


图4 改进SOGI伯德图

零, $Q(s)$ 相角滞后 $D(s)$ 相角 90° 。

当电网频率受到扰动时, 由于 qv' 信号输出侧补偿一个 ω'/ω_0 项, 此时 $Q(s)$ 的幅相特性为

$$\begin{cases} |Q| = \frac{k\omega_0^2}{\sqrt{(k\omega_0\omega')^2 + (\omega_0^2 - \omega'^2)^2}} \frac{\omega'}{\omega_0} \\ \angle Q = \tan^{-1} \left(-\frac{\omega_0^2 - \omega'^2}{k\omega_0\omega'} \right) \end{cases} \quad (9)$$

$D(s)$ 的幅相特性与式(7)类似, 此时 $D(s)$ 和 $Q(s)$ 仍然正交, 但是由于各自幅频特性中只含有一个扰动量, 系统的鲁棒性和抗扰性将大大加强。

4 低电压穿越控制策略

根据LVRT技术规范, 光伏电站在电网发生暂态故障时需具备一定LVRT能力, 且在故障期间逆变器能向电网输送无功功率以支撑电网电压^[6]。针对电网电压不平衡跌落时产生的不对称分量问题, 文献[7-8]均采用正、负序双电流环控制, 利用两个对称的 dq 旋转坐标系对正、负序电流进行控制。但在该控制方式下环路中需要四个PI控制器, 复杂的控制结构降低了系统的响应速度。本文选择只控制正序电流、负序电流通过负序电压前馈的方式进行控制。以正序电流的控制为例, 具体方法如图5所示。

图5中, dq 轴的正序电压及锁相角 θ 由

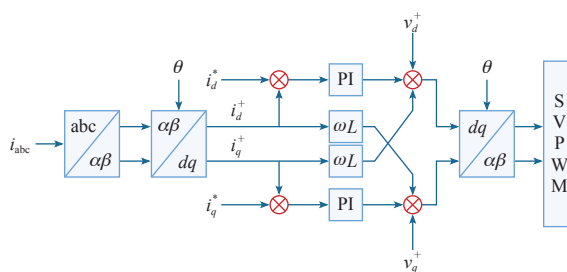


图5 LVRT电流环示意图

DSOGI-PLL给出。正序电流在与参考值比较得到偏差后经过PI控制器, 加上前馈电流的解耦项, 通过反Park变换后进入SVPWM得到开关管的驱动信号, 完成对逆变器的控制。

采用TMS320F28335芯片对系统进行控制。CPU不断采集三相电压数据, 判断电网电压是否异常。电网正常运行时, 逆变器以功率因数1并网运行; 当电网发生电压跌落时, 判断故障类型及跌落深度, 并发出无功功率支撑电网电压。具体控制策略流程图如图6所示。

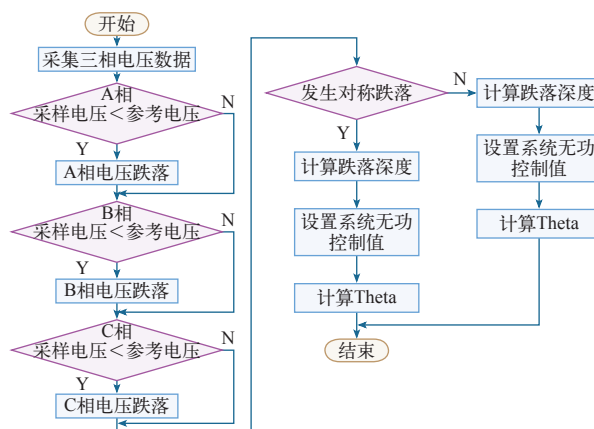


图6 LVRT控制策略软件流程图

5 仿真及试验结果

为验证理论分析的正确性, 在Matlab平台中搭建逆变器模型和控制环路, 模拟电压跌落工况, 验证改进SOGI单元的DSOGI-PLL性能。具体控制参数: 锁相环中 $k_p = 30$, $k_i = 0.02$; 电流控制环中 $k_p = 5$, $k_i = 200$ 。模拟电网电压单相跌落, 得到仿真结果如图7所示。

根据仿真结果可以看出, 改进SOGI单元后的DSOGI-PLL在电网电压跌落时仍能精准锁相, 抗

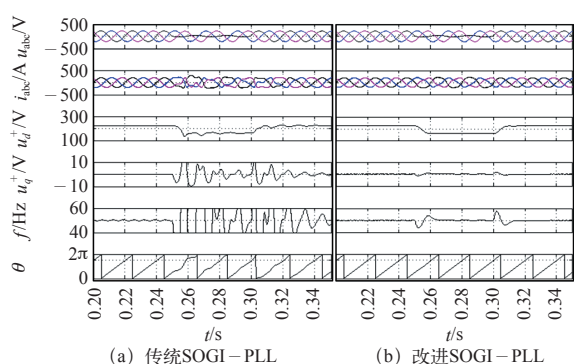


图7 仿真波形

干扰性能更强。

最后搭建50 kW三相并网逆变器试验平台，采用前述低压穿越控制策略进行试验。由于三相三线制系统只能采集到线电压，其和对应相电流有30°相差。设置电网并网电压有效值为500 V，试验波形如图8所示。从图8中可以看出，低压穿越期间，改进SOGI单元后的DSOGI-PLL能成功锁相。电压跌落前后相电流的相位发生变化，说明在电压降低后系统发出无功电流以支撑电网电压。

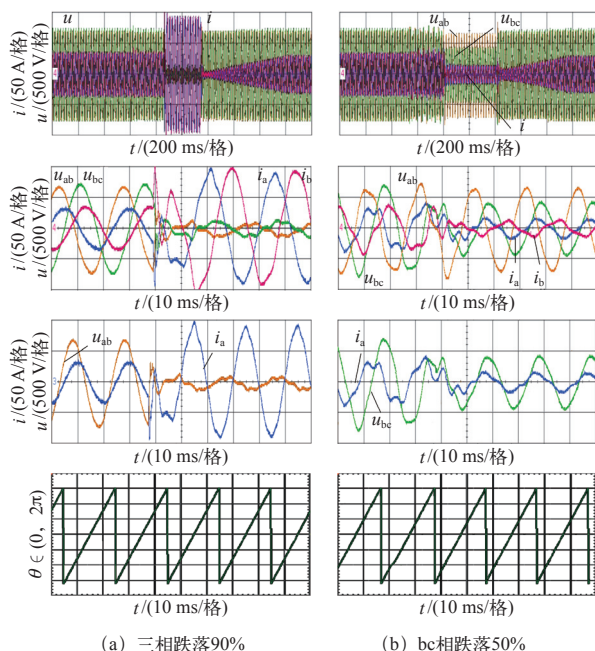


图8 试验波形

6 结束语

研究了光伏并网逆变器在电网电压发生不对称故障时的锁相状态，针对使用传统SOGI单元的DSOGI-PLL锁相环在电网故障产生不对称分量

时输出信号不稳定的问题提出了一种改进策略，即采用固定角频率输入和增加补偿项保证信号稳定。对新系统进行仿真验证和LVRT试验，试验结果表明改进SOGI单元后的DSOGI-PLL能够精确锁定电网相位，结构更简单，电网适应性更强，完全满足低压穿越的要求。

参考文献

- [1] Remus T, Marco L, Pedro R. 光伏与风力发电系统并网变换器 [M]. 周克亮, 王政, 徐青山, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 黄显斌, 林达, 王慧芳, 等. 并网光伏系统低电压穿越策略综述 [J]. 机电工程, 2016, 33 (5): 589-594.
- [3] 刘述奎, 韩莹, 李奇, 等. 基于双二阶广义积分锁相环的燃料电池并网系统研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (5): 122-128.
- [4] 谢聪, 吴新开, 雷雅云, 等. 基于双二阶广义积分锁相的风电并网系统仿真 [J]. 电气传动自动化, 2015, 37 (2): 1-5.
- [5] Jie L, Jing Z, Jia W, et al. Improved dual second-order generalized integrator PLL for grid synchronization under non-ideal grid voltages including DC offset [C]. Proceedings of Energy Conversion Congress and Exposition, 2014: 136-141.
- [6] 李建文, 雷亚雄, 李永刚, 等. 并网逆变器电压支撑的参考电流值 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (10): 276-282.
- [7] 王晓兰, 董振华, 梁琛, 等. 不对称故障下光伏发电系统的电压稳定控制策略 [J]. 电气传动, 2014, 44 (12): 44-48.
- [8] Jin Lijun, Cheng Yifan. Unbalanced control of grid-side converter based on DSOGI-PLL [C]. 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015: 1145-1149.
- [9] 陈亚爱, 刘劲东, 周京华, 等. 太阳能并网逆变器故障穿越控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (21): 3045-3412.

(收稿日期: 2017-12-18) EA