

DOI: 10.7667/PSPC171801

基于 $\alpha\beta$ 分量滤波直接解耦风电并网锁相环设计

朱建红, 黄琼, 孟棒棒

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 准确锁定电网电压的频率和相位是风力发电友好并网的重要前提之一。在此领域创新性地引进基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环技术。首先利用正交信号发生器(QSG)对正序和负序分量进行正交变换和滤除谐波。其次, 通过直接解耦法对电压分量(V_α 和 V_β)基波正负序分量进行解耦并经过低通滤波器再次滤波, 进而得到所需的三相电压正序基波分量。最后, 根据设计的理论结果, 利用仿真软件分情况对电网故障进行技术应用效果仿真, 并与当前正在应用的风电并网系统中的基于双同步解耦坐标变换的锁相环技术进行性能对比。结果表明, 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环有更好的频率与相位跟踪特性, 更有利于风力发电系统电网侧变流器同步并网。
关键词: 直接解耦法; 正交信号发生器(QSG); 锁相环; 风电并网

Direct decoupling wind power grid-connected phase-locked loop design based on $\alpha\beta$ component filtering

ZHU Jianhong, HUANG Qiong, MENG Bangbang

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Accurately locking the frequency and phase of the grid voltage is one of the important prerequisites for friendly grid-connected wind power. The topic is to introduce a direct decoupling three-phase phase-locked loop technology based on $\alpha\beta$ component filtering in this field. Firstly, Orthogonal Signal Generator (QSG) is used to orthogonally transform and filter out harmonics of positive and negative sequence components. Secondly, the positive and negative sequence components of the voltage components (V_α and V_β) are decoupled by a direct decoupling method and filtered again by a low-pass filter to obtain the required positive sequence fundamental component of the three-phase voltage. Finally, based on the theoretical results of the design, simulation results are used to simulate the technical application effects of the grid faults, and the performance comparison is made with the phase locked loop technology based on the double synchronous decoupling coordinate transformation in the currently applied grid-connected wind power system. The results show that the direct decoupling of the three-phase phase-locked loop based on the $\alpha\beta$ component filtering has better frequency and phase tracking characteristics, which is more conducive to grid synchronization of grid-side converters in wind power generation systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377047 and No. 61673226), Natural Science Foundation of Jiangsu Colleges and Universities (No. 17KJA470006), and General Program of Natural Science Foundation of Jiangsu Colleges and Universities (No. 5KJB470014).

Key words: direct decoupling method; Orthogonal Signal Generator (QSG); phase-locked loop; wind power integration

0 引言

在能源紧缺和环境保护的双重压力下, 世界各国认识到发展可再生能源的重要性。风能是一种储

量极为丰富的清洁能源, 它的应用能够减少因化石燃料的燃烧带来的污染, 显著改善经济、环境和社会效益^[1-4], 对于社会的可持续发展有着重要意义。可是, 风能具有不稳定性, 风力发电机输出的电压幅值、频率、相位随时会发生变化。风电并网时, 如果电网电压的采样不准, 会影响风电与电网电压的同步问题, 加剧风电场脱网事件。因此, 实时锁定电网电压的频率和相位具有十分重要的意义^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51377047, 61673226); 江苏省高等学校自然科学基金(17KJA470006); 江苏省高校自然科学研究面上项目(5KJB470014)

为保证电网电压不平衡等故障情况风电系统并网可靠运行, 必须准确而快速地检测电网电压正序基波分量的频率和相位, 为风力发电并网系统提供保障^[6-10]。现有电网电压相位信号获取方法主要采用过零比较和锁相环(PLL)技术。过零比较由于过零点易受网侧电压干扰导致误差, 当电压跌落、相位以及频率发生突变时检测效果不佳^[11-12]。基于锁相环的电网电压相位信号检测法在风电并网侧变流器装置中应用广泛。在并网应用中, 文献[13-15]提及的同步参考系锁相环(SRF-PLL)是一种常用的同步技术, 其具有易于实现和性能稳定等优点。在理想的电网条件下, SRF-PLL 可实现快速准确的相位/频率检测; 然而, 电压不平衡和畸变的电网状况会大大降低其性能甚至是锁相失败。为了克服这个缺点, 已经提出了几种改进的锁相环, 文献[16-17]提出了一种基于双同步解耦坐标变换的锁相环, 通过对电压信号进行正(负)序旋转坐标变换得到各分量的耦合关系, 利用负序同步旋转坐标变换及变换矩阵直流分量, 对正序同步旋转坐标变换下的 q 轴分量进行补偿, 可有效地消除正序同步中的二倍频分量, 从而准确锁定基波电压正序相位。文献[18]提出了一种基于正负序快速识别的动态锁相同步方法, 该方法通过 A/D 采样模块对三相交流电压瞬时值进行连续 3 次均匀采样及 Clark 变换得到相邻两次采样的电角度差, 从而获得正、负序分量的识别相位, 并分别进行锁相处理获得正、负序分量的锁相相位, 在此基础上附加动态补偿量, 使得正(负)序分量的动态锁相相位实时快速跟随所述正(负)序分量识别相位, 达到准确锁相目的。文献[19]采用 2 个 EPLL 对电网电压的 $\alpha\beta$ 分量进行正交变换, 利用正序算法来提取正序基波电压分量, 再经 SRF-PLL 锁定正序基波电压的相位和频率, 从而消除电压不平衡对检测结果的影响。文献[20]通过采用一种谐振式锁相环技术, 能够快速补偿锁相过程中电网不平衡等故障引起的相位跟踪误差。文献[21-23]提及的 PLL 通过构建二阶广义积分器(SOGI)来实现 90° 偏移, 具有频率自适应性能, 可以滤除高次谐波, 实现在电网不平衡、频率突变及谐波污染情况下准确跟踪相位和频率。

文章提出的基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环设计方法, 在风电并网中应用效果与普通的增强型锁相环(EPLL)和基于双二阶广义积分器的锁相环(DSOGI-PLL)不同, 不需要利用正负序算法进行正负序分离, 直接采用 $\alpha\beta$ 分量解耦滤波, 得到电网电压的正序基波分量^[24]。使其结构更为简单, 同时具有频率自适应的滤波性能, 对谐波有较

好的抑制作用; 在发生电网电压及频率相关故障情况下可以快速准确地锁定电压正序基波分量的相位和频率, 确保准确跟踪。

1 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦锁相环总体设计

在包含正序、负序和零序分量的三相电网中, 正交信号发生器如基于增强型锁相环和二阶广义积分法能进行正交变换和滤除谐波的影响, 但不能实现正负序分量之间的解耦。为解决此问题, 提出基于 $\alpha\beta$ 直接解耦同步法进行电网电压基波正负序分量分离, 得到所需的电网电压正序基波分量。再通过 SRF-PLL 快速准确地锁定电网电压正序基波分量的相位和频率, 实现三相锁相环精确锁相。由于是基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环, 需要进行 Clarke 变换, 所以可以不用考虑零序分量的影响^[25]。因此, 电网不平衡三相电压模型数学表达式为^[14,24]

$$\mathbf{V}_{abc} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^{+1}) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi^{+1}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi^{+1}) \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1}) \\ \cos(-\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi^{-1}) \\ \cos(-\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式(1)经 Clarke 变换, 得

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^{+1}) \\ \sin(\omega t + \varphi^{+1}) \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1}) \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设 $\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha}^{+} \\ V_{\beta}^{+} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\alpha}^{-} \\ V_{\beta}^{-} \end{bmatrix}$ 可得^[24]

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}^{+} \\ V_{\beta}^{+} \end{bmatrix} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^{+1}) \\ \sin(\omega t + \varphi^{+1}) \end{bmatrix} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^{+1}) \\ \cos(\omega t + \varphi^{+1} - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}^{-} \\ V_{\beta}^{-} \end{bmatrix} = V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1}) \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1}) \end{bmatrix} = V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1}) \\ \cos(-\omega t + \varphi^{-1} - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知, 在正序分量中 $V_{\beta}^{+} = qV_{\alpha}^{+}$

是滞后 V_α^+ 90° 的信号, 负序分量中 $V_\alpha^- = qV_\beta^-$ 是滞后 V_β^- 90° 的信号。由此式(2)变换得

$$\begin{bmatrix} V_\alpha^+ \\ V_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_\alpha^- \\ V_\beta^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} qV_\beta^- \\ qV_\alpha^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此, 可得基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环的总体结构, 如图1所示。

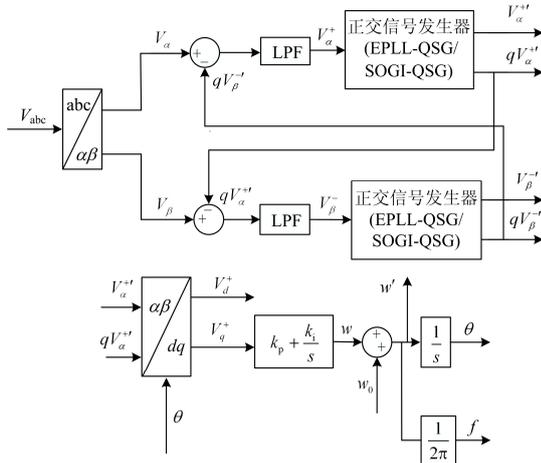


图1 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环结构
Fig. 1 Structure of the direct decoupling phase locked loop based on $\alpha\beta$ component filtering

从图1中可得, $V_\alpha^{+'}$ 和 $qV_\beta^{+'}$ 经过 dq 旋转坐标系得到 V_d^+ 和 V_q^+ ; 由式(3)变换得 $V_q^+ = V^{+1} \sin(\omega t + \varphi^+ - \theta)$, 得到的 V_q^+ 经过PI调节, 再加上电网的额定角频率 ω_0 , 得电网电压的三相锁相环角频率为

$$\omega' = V_q^+ \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + \omega_0 \quad (6)$$

由 $f = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega'$ 得, 锁相环的频率为

$$f = \frac{V_q^+ \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + \omega_0}{2\pi} \quad (7)$$

锁相环角频率经过积分得到电网电压的相位角为

$$\theta = [V_q^+ \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + \omega_0] \cdot \frac{1}{s} \quad (8)$$

2 正交信号发生器

正交信号发生器能够实现输入信号的正交变换。基于EPLL和SOGI的正交信号发生器不仅能输出正交分量, 还能滤除输入信号中的谐波, 从而得到所需要的基波正负序正交分量。

2.1 基于EPLL的正交信号发生器

EPLL可用于单相锁相, 也可用作正交信号发

生器。基于EPLL正交信号发生器(EPLL-QSG)结构如图2所示。图2输入是经坐标变换得到的电压 V_α , 利用其 90° 相位偏移, 输出相互正交的电压 V_α' 和 qV_α' , 其中参数 k 主要控制幅值的收敛速度。控制器PI具有谐波抑制作用, 能很好地滤除输入信号中的高次谐波, 得到所需的正负序基波正交分量。输出 V_α' 和 qV_α' 分别求取为

$$V_\alpha' = \frac{k \sin^2 \theta}{s + k \sin^2 \theta} \cdot V_\alpha \quad (9)$$

$$qV_\alpha' = -\frac{k \sin \theta \cos \theta}{s + k \sin^2 \theta} \cdot V_\alpha \quad (10)$$

同理可求取电压 V_β 。

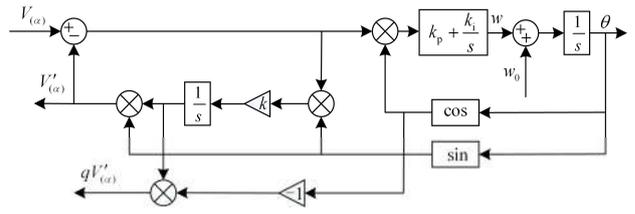


图2 EPLL正交信号发生器结构图

Fig. 2 EPLL orthogonal signal generator structure

2.2 基于SOGI的正交信号发生器

基于SOGI的正交信号发生器(SOGI-QSG)结构图如图3所示。输入是经坐标变换得到的电压 V_α , 经过 90° 相位位移, 输出两正交电压 V_α' 和 qV_α' , $\varepsilon_{v(\alpha)}$ 为输入信号 V_α 和输出信号 V_α' 的误差, ω' 为锁相环反馈角频率, k 为系统参数, 其传递函数如式(11)—式(13)所示^[21]。

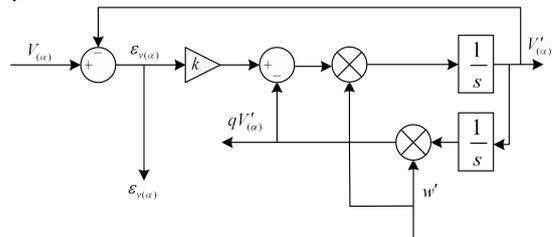


图3 SOGI正交信号发生器结构图

Fig. 3 SOGI orthogonal signal generator structure

$$H(s) = \text{SOGI}(s) = \frac{V_\alpha'}{k\varepsilon_v(\alpha)}(s) = \frac{w's}{s^2 + w'^2} \quad (11)$$

$$D(s) = \frac{V_\alpha'}{V_\alpha}(s) = \frac{kw's}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (12)$$

$$Q(s) = \frac{qV_\alpha'}{V_\alpha}(s) = \frac{kw'^2}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (13)$$

同理可求取电压 V_β 。其中, $H(s)$ 为系统传递函数, $D(s)$ 和 $Q(s)$ 可看作带通滤波器和低通滤波器,

由于 SOGI 自适应滤波器带宽与 w' 无关, 且只取决于参数 k , 因此 SOGI 能适应频率突变及谐波污染场合。

3 引入锁频环的 SOGI-QSG 锁相算法

SOGI 正交信号发生器需要进行频率反馈, 其频率反馈基于 PLL 锁相环模块的频率值, 这样会导致频率反馈环和相位反馈环交错耦合, 带来系统动态响应超调大和初始稳定时间过长现象。为避免信号发生三相电压不平衡及频率突变时动态响应速度慢和超调过大等缺点, 可引入锁频环代替锁相环检测频率值作为反馈。结合图 1, 系统的两个输入量 V_α 和 V_β 拥有相同的频率, 于是只需要一个锁频环就可实时检测输入信号的频率, 可得锁频环结构如图 4 所示。其中 V_α 和 V_β 正交信号发生器所产生的误差值可设计为计算频率误差信号平均值^[11]。可得

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{f(\alpha)} + \varepsilon_{f(\beta)}}{2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{v(\alpha)} \cdot qV_\alpha^{+'} + \varepsilon_{v(\beta)} \cdot qV_\beta^{+'}) \quad (14)$$

由平均值可求得锁频环的频率反馈值为

$$w' = w_0 s \cdot \frac{[(V_\alpha^{+'})^2 + (qV_\alpha^{+'})^2]}{1/2\Gamma k \varepsilon_f + s[(V_\alpha^{+'})^2 + (qV_\alpha^{+'})^2]} \quad (15)$$

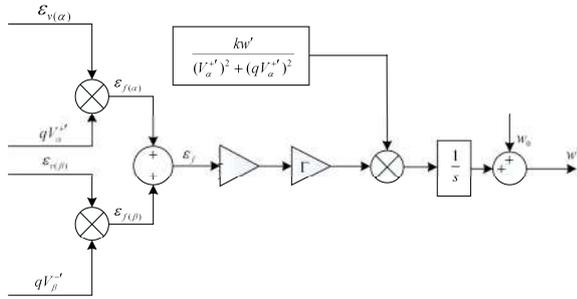


图 4 基于 SOGI-QSG 锁频环的结构图

Fig. 4 Locked loop structure based on SOGI-QSG frequency

4 系统仿真分析

采用 Matlab/Simulink 仿真平台, 针对三相电压不平衡、频率突变及谐波污染等情况, 结合文献 [16-17] 所提出的一种基于双同步解耦坐标变换的锁相环及基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环技术进行应用效果仿真分析。仿真系统参数设置如表 1 所示。

4.1 电网三相电压不平衡分析

以 V 作为基准值进行标幺化, 在三相电压不平衡情况下, 设输入正序电压分量幅值为 $V=1$, 初始相位角为 0 ; 输入负序电压分量幅值为 0.2 , 初始相位角为 30° ; 频率 $f=50$ Hz; 其他仿真参数如表 1 所示。基于双同步解耦坐标变换的锁相环和提出的

基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环的仿真结果如图 5—图 7 所示。

表 1 仿真参数设计

Table 1 Simulation parameter design

锁相方案		增益	PI 参数
基于双同步解耦坐标系锁相环		—	$k_p=102$ $k_i=5\ 204$
基于 $\alpha\beta$ 分量滤波直接解耦三相锁相环	基于 EPLL 的正交信号发生器	$k=180$	$k_p=102$ $k_i=5\ 204$
	基于 SOGI 的正交信号发生器	$k=0.707$	$k_p=102$ $k_i=5\ 204$
	锁相算法中引入锁频环	$k=0.707$ $\Gamma=46$	$k_p=102$ $k_i=5\ 204$

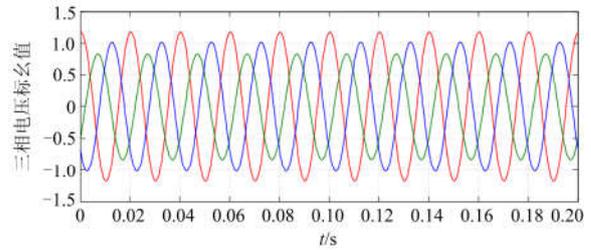


图 5 三相电网电压不平衡结构图

Fig. 5 Three-phase grid voltage unbalanced structure

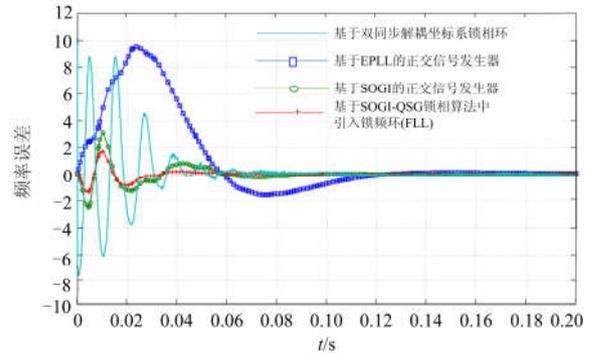


图 6 检测频率与实际频率误差对比结果

Fig. 6 Comparison results of detection frequency and actual frequency error

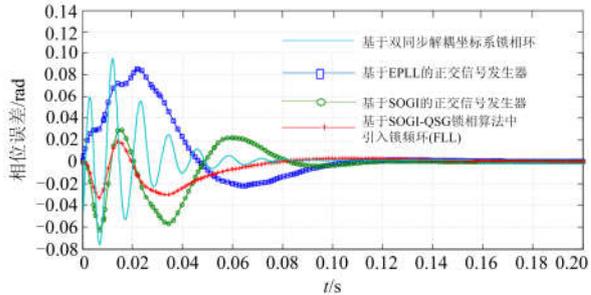


图 7 检测相位与实际相位误差对比结果

Fig. 7 Comparison results of detection phase and actual phase error

从图 6—图 7 中可以看出, 在三相电压不平衡时, 基于双同步解耦坐标变换的锁相环具有较好的锁相性能, 其频率误差需经过大约 2.5 个工频周期可进入 50 Hz/s($\pm 2\%$)的稳定状态, 频率误差响应最大值为 8.72 Hz/s, 频率超调量为 $\sigma\%=8.72/50=17.4\%$; 而相位波动的最大值为 0.094 r/s, 需要经过 5 个周期相位误差才趋近于 0。基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环能很好地稳定并跟踪电网电压的频率和相位, 其中基于 EPLL 正交信号发生器方法频率误差需经过大约 4.5 个工频周期才进入 50 Hz/s($\pm 2\%$)的稳定状态, 频率误差响应的最大值为 9.22 Hz/s, 频率超调量为 $\sigma\%=9.22/50=18.4\%$, 而相位波动的最大值为 0.083 r/s, 需要经过 6 个周期相位误差才趋近于 0; 基于 SOGI 的正交信号发生器方法的频率误差大约经过 1.5 个工频周期就可进入 50 Hz/s($\pm 2\%$)的稳定状态, 频率误差响应的最大值为 3.26 Hz/s, 频率超调量为 $\sigma\%=3.26/50=6.5\%$, 而相位波动的最大值为 0.062 r/s, 需要经过 4.5 个周期相位误差趋近于 0; 基于 SOGI-QSG 锁相算法中引入锁频环方法的频率误差需要经过大约 1 个工频周期就可进入 50 Hz/s($\pm 2\%$)的稳定状态, 频率误差响应的最大值为 1.94 Hz/s, 频率超调量为 $\sigma\%=1.94/50=3.9\%$, 而相位波动的最大值为 0.034 r/s, 需要经过 3.5 个周期相位误差趋近于 0。综上可知, 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦模块中 SOGI-QSG 锁相算法引入锁频环方法的频率和相位追踪性能效果最佳, 频率误差和相位误差的偏差与超调量最小, 锁定相位用时最短。

4.2 电网三相电压频率突变及谐波污染分析

以 V 作为基准值进行标么化, 在三相电压频率突变及谐波污染情况下, 设三相电压的谐波为含 0.1 p.u. 的 5 次负序分量谐波, 频率突变为 47 Hz; 其他仿真参数如表 1 所示, 基于双同步解耦坐标变换的锁相环和基于 $\alpha\beta$ 分量滤波直接解耦三相锁相环的仿真结果如图 8—图 10 及表 2 所示。

表 2 方案比较

Table 2 Contrast of schemes

参数	基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环			
	基于双同步解耦坐标系锁相环	基于 EPLL 的正交信号发生器	基于 SOGI 的正交信号发生器	锁相算法中引入锁频环
频率稳定, 周期(T)	2.5	4.5	3	1.5
频率超调量 (100%)	10.8	21.4	15.2	9.3
相位波动最大值(100%)	0.163	0.207	0.362	0.106
相位趋近于 0 周期	4	4	5	2.5

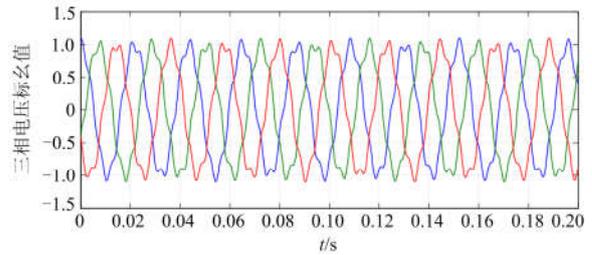


图 8 三相电网电压频率突变及谐波污染结构图

Fig. 8 Three-phase power grid voltage frequency mutation and harmonic pollution structure

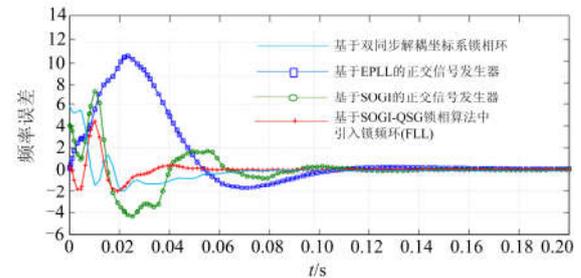


图 9 检测频率与实际频率误差对比结果

Fig. 9 Comparison results of detection frequency and actual frequency error

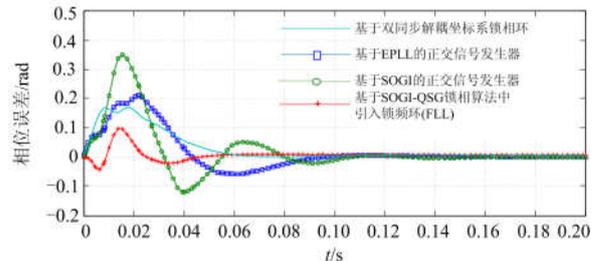


图 10 检测相位与实际相位误差对比结果

Fig. 10 Comparison results of detection phase and actual phase error

从图 9—图 10 可看出, 基于双同步解耦坐标变换的锁相环与基于 $\alpha\beta$ 分量滤波直接解耦三相锁相环均能较好地稳定并跟踪电网电压的频率和相位。

其中基于双同步解耦坐标变换的锁相方法的频率误差值经过大约 2.5 个工频周期就进入 50 Hz/s($\pm 2\%$) 的稳定状态, 频率误差响应的最大值为 5.4 Hz/s, 频率超调量为 $\sigma\%=5.4/50=10.8\%$, 而相位波动的最大值为 0.163 r/s, 需要经过 4 个周期, 相位误差趋近于 0。而基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相模块中, 由于 SOGI-QSG 锁相算法中引入锁频环, 该方法锁定相位效果稍好, 其中频率误差值经过大约 1.5 个工频周期就可进入 50 Hz/s($\pm 2\%$)稳定状态, 频率误差响应的最大值为 4.67 Hz/s, 频率超调量为

$\sigma\%=4.67/50=9.3\%$, 而相位波动的最大值为 0.106 r/s, 需要经过 2.5 个周期相位误差趋近于 0。总的来说, 电网三相电压频率突变及谐波污染状况下, 两种锁相环方法动态性与稳定性均有较好表现, 都能较好地锁定三相电网电压频率和相位。

5 结语

实际三相电网由于非线性用电设备及故障等各种因素存在, 使得三相电网电压偶尔出现波动性变化。为提高风力发电系统电网侧变流器并网能力, 需要及时准确获取电网电压的相位和频率动态信息。基于双同步解耦坐标变换的锁相方法与文章所用的基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相锁相环在三相电网电压不平衡、频率突变及谐波污染状况下的应用效果表明, 其均能稳定跟踪电网电压的频率和相位, 但在要求锁相精度高时, 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波的直接解耦三相模块中 SOGI-QSG 锁相算法引入锁频环技术, 该方法锁定效果更佳。当然, 课题所用方法在风电系统并网中的应用可行性验证是在仿真环境下进行的, 在实际的风电并网系统中, 控制系统的程序编制及现场嵌入接口设计与调试还有待下一步工作展开, 相关成果也将发表在后续文章中。

参考文献

- [1] 陈煜. 新型储能双馈风电机组的运行与控制仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
CHEN Yu. Study on operation and control simulation of a new type of energy storage doubly-fed wind turbine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [2] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [3] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [4] 赵勇, 王冰佳, 王杰彬. 风力机叶片质量控制难点分析及对策[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 132-136.
ZHAO Yong, WANG Bingjia, WANG Jiebin. Difficulties and countermeasures of quality control in wind turbine blades[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 132-136.
- [5] 林百娟. 三相电压不平衡条件下锁相环的设计与实现[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.
LIN Baijuan. Design and implementation of phase-locked loop under unbalanced three-phase voltage[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009.
- [6] OUCHEN S, BETKA A, GAUBERT J P. Simulation and real time implementation of predictive direct power control for three phase shunt active power filter using robust phase-locked loop[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2017, 78: 1-17.
- [7] JIANG Weidong, HU Yang, ZHANG Yi, et al. Different control objectives for grid-connected converter under unbalanced grid voltage using forgotten iterative filter as phase lock loop[J]. Power Electronics IET 2015, 8(9): 1798-1807.
- [8] 马临超, 蒋炜华, 薛宝星. NPC 型三电平永磁同步风力发电并网逆变器模型预测控制满足低电压穿越要求研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 151-156.
MA Linchao, JIANG Weihua, XUE Baoxing. Research on model predictive control of NPC three-level permanent magnet synchronous wind power grid-connected inverter to meet low voltage ride-through requirements[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 151-156.
- [9] 高海翔, 陈颖, 许寅. 双馈风机的电磁暂态平均化建模和快速仿真[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 59-64.
GAO Haixiang, CHEN Ying, XU Yin. Averaged modeling and fast electromagnetic transient simulation for doubly-fed wind turbines[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 59-64.
- [10] 杨苹, 叶超. 风电优先上网的风水火电力系统联合优化调度[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 31-36.
YANG Ping, YE Chao. Combined optimal dispatching of wind-hydro-thermal power system with wind power priority in accessing to power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 31-36.
- [11] 谢聪, 吴新开, 雷雅云. 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.
XIE Cong, WU Xinkai, LEI Yayun. Simulation of grid-connected wind power system based on double second-order generalized integral phase lock[J]. Electrical Drive Automation, 2015, 37(2): 1-5.
- [12] GOLESTAN S, MONFARED M, FREIJEDO F D. Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(2): 765-778.
- [13] 徐青青, 陈莹, 刘莉, 等. 一种双正弦幅值积分器解耦

- 锁相环的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 132-137.
- XU Qingqing, CHEN Ying, LIU Li, et al. Design of decoupled double sinusoidal amplitude integrator phase-locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 132-137.
- [14] 辛业春, 李国庆, 王尧, 等. 基于双 dq 坐标变换的三相电压锁相环的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 114-118.
- XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Yao, et al. Study of three-phase voltage phase locked loop based on double dq transformation synchronous reference frame[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 114-118.
- [15] SUN Guangyu, LI Yongli, JIN Wei. Nonlinear three-phase phase-locked loop based on linear active disturbance rejection controller[J]. IEEE Journals & Magazines, 2017(5): 21548-21556.
- [16] 唐轶, 沈佳, 刘齐齐, 等. 改进型解耦自适应复数滤波器的锁相环研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 120-127.
- TANG Yi, SHEN Jia, LIU Qiqi, et al. Study on improved crossing-decoupling frequency-adaptive complex filter PLL[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 120-127.
- [17] 李研达. 基于双派克变换的新型三相锁相环技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(3): 253-257.
- LI Yanda. New three-phase phase-locked loop technology based on double-pick transformation[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(3): 253-257.
- [18] 胡家兵, 王波. 一种基于正负序快速识别的动态锁相同步方法: 中国, 201410418266.8[P]. 2014-08-26.
- HU Jiabing, WANG Bo. A dynamic phase-locked synchronization method based on rapid identification of positive and negative sequences: China, 201410418266.8[P]. 2014-08-26.
- [19] 田桂珍, 王生铁, 刘广忱, 等. 风力发电系统中电网同步改进型锁相环设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1546-1552.
- TIAN Guizhen, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al. Design of phase locked loop improved synchronization in wind power generation system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1546-1552.
- [20] 徐海亮, 章玮, 胡家兵, 等. 电网电压不平衡及谐波畸变时基波电压同步信号的检测[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 90-95.
- XU Hailiang, ZHANG Wei, HU Jiabing, et al. Detection of fundamental wave voltage synchronization signal during grid voltage imbalance and harmonic distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 90-95.
- [21] 范守婷, 王政. 风力发电并网变流器同步技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 100-106.
- FAN Shouting, WANG Zheng. Research on synchronization of wind driven grid-connected converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 100-106.
- [22] 巩冰, 王科俊, 马晓伟. DSOGI-PLL 算法在不平衡和畸变电网电压监测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(1): 154-160.
- GONG Bing, WANG Kejun, MA Xiaowei. Application of DSOGI-PLL algorithm in unbalanced and distorted grid voltage monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2015, 34(1): 154-160.
- [23] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型 DSOGI-PLL 的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
- TU Juan, TANG Ningping. Detection of grid voltage synchronization signal based on improved DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [24] 刘锋. 电网不平衡下三相锁相环研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- LIU Feng. Study on three-phase phase-locked loop under grid imbalance[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [25] 郝来迎, 王金富, 侯川川, 等. 基于三阶广义积分的锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 184-189.
- XI Laiying, WANG Jinfu, HOU Chuanchuan, et al. Design of phase locked loop based on third-order general-integrator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 184-189.

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2018-05-17

作者简介:

朱建红(1971—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 硕导, 研究方向为电工技术与新能源发电; E-mail: jh.zhu@ntu.edu.cn

黄琼(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程;

孟棒棒(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程。

(编辑 魏小丽)