

电网故障下风力发电系统网侧电压同步信号检测^{*}

涂娟, 赵翔

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 风力发电系统网侧变换器的并网性能依赖于高性能的同步检测系统, 尤其是在电网电压故障情况下快速而准确地提取同步信号。在双同步参考坐标系下提出一种基于二阶广义积分器(SOGI)的新型锁相环, 消除了 dq 变换中电网电压不平衡和低次谐波产生的 2 倍频和谐波变换交流分量带来的影响, 实现了对基波电压同步信号的检测。MATLAB 仿真和试验结果表明: 该方法能快速有效地实现对基波电压正、负序分量以及电压频率、相位的提取。

关键词: 风力发电系统; 电压不平衡; 谐波畸变; 二阶广义积分器; 锁相环; 同步信号检测

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)03-0081-06

doi: 10.12177/emca.2019.173

Synchronizing Signal Detection of Grid Voltage in Wind Power Generation Systems Under Grid Faults^{*}

TU Juan, ZHAO Xiang

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The grid-connected performance of grid-side converters in wind power generation system depends on high-performance synchronous detection system, the quick and accurate extraction of synchronizing signal under power grid fault in especial. A novel phase locked loop based on second-order generalized integrator (SOGI) is proposed, which eliminates the influence of the unbalanced and distorted grid voltage in the dq transform, as well as that of the second-order and higher order harmonic components, realizing the detection of synchronizing signal of the fundamental voltage. MATLAB simulation and experimental results show that the frequency, phase angle and positive and negative sequence components can be obtained quickly and efficiently.

Key words: wind power generation system; voltage unbalance; harmonic distortion; second-order generalized integrator (SOGI); phase locked loop; synchronizing signal detection

0 引言

风力发电系统网侧变换器需要将发电机发出的电能送往交流电网, 实现有功功率和无功功率的动态控制, 低电压穿越, 电网故障期间的无功支持和电网电压的恢复等。网侧变换器的并网性能依赖于高性能的同步检测系统, 尤其是在电网故障情况下实现快速准确地提取同步信号^[1-2]。

随着并网技术研究的深入, 研究人员提出了多种提取电网电压同步信号的方法。电网电压同步信号的提取可在静止坐标系下进行^[3-4], 也可在单/双同步参考坐标系下进行^[5-7]。基于同步参考坐标系的锁相环(SRF_PLL)一般适用于电网电压平衡时的同步信号检测^[6], 无法很好地抑制电网电压不平衡时负序分量的影响。基于双同步参考坐标系的锁相环(DDSRF_PLL)包含以正

收稿日期: 2019-11-20; 收到修改稿日期: 2020-01-10

^{*} 基金项目: 福州大学人才基金项目(XRC-17043)

作者简介: 涂娟(1976—), 女, 博士, 研究方向为风力发电控制技术和含储能系统的风电并网关键技术。

赵翔(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能检测。

序同步转速和负序同步转速旋转的 2 个旋转坐标系, 并采用解耦网络消除参考坐标轴上 2 倍频的振荡^[7], 但需要使用低通滤波器, 影响了锁相环 (PLL) 的动态性能。基于延时信号消除 (DSC) 的 PLL 利用正弦信号的半波对称性, 消除了负序分量带来的 2 倍频波动, 获取了基波的正、负序分量^[8-9]。陷波器、二阶广义积分器 (SOGI) 等自适应滤波器也可用于提取电网电压同步信号^[10-14]。但是, 这些提取方法在电网电压低次谐波含量较大时, 会影响正负序分量的提取效果。为此, 文献[14]提出一种多 SOGI 结构, 文献[15]提出一种基于解耦多同步参考坐标系的锁相技术, 文献[16]提出一种基于多静止坐标系解耦锁相的同步信号检测方法。这些方法解决了低次谐波对同步信号提取的影响问题, 但结构复杂。文献[17]在双二阶广义积分器的锁相环 (DSOGI-PLL) 的基础上提出了一种改进型锁相环, 利用 SOGI 的正交和频率特性构造谐波消除模块, 并采用模块级联的结构消除各次谐波, 在电网故障情况下快速准确地提取电网电压同步信号。

本文在双同步参考坐标系下提出了一种基于 SOGI 的新型 PLL, 可以快速准确地提取电网电压不对称和谐波情况下的电网电压同步信号。

1 双同步参考坐标系

双同步参考坐标系包括 2 个旋转坐标系^[7]: 正序参考坐标系 dq^+ 和负序参考坐标系 dq^- , 如图 1 所示。图 1 中, 正序参考坐标系旋转速度和相角为 ω 和 θ , 负序参考坐标系旋转速度和相角为 $-\omega$ 和 $-\theta$ 。

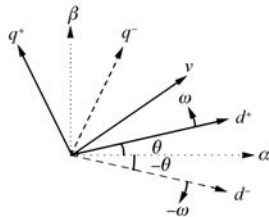


图 1 双同步参考坐标系

不对称且含有谐波的电网电压可以表示为正序分量、负序分量和谐波分量之和:

$$u_i = U^{(+1)} \cos \left[\omega t + \phi^{(+1)} - k_i \frac{2\pi}{3} \right] +$$

$$U^{(-1)} \cos \left[-\omega t + \phi^{(-1)} - k_i \frac{2\pi}{3} \right] + \sum U^{(n)} \cos \left[n\omega t + \phi^{(n)} - k_i \frac{2\pi}{3} \right] \quad (1)$$

式中: $U^{(+1)}$ 、 $U^{(-1)}$ 、 $U^{(n)}$ 为电网电压正序、负序和谐波分量的幅值; ω 为基波频率; $\phi^{(+1)}$ 、 $\phi^{(-1)}$ 、 $\phi^{(n)}$ 为电网电压正序、负序和谐波分量的初相角; k_i 为系数, 当 $i=a, b, c$ 时, 对应的 $k_i=0, 1, -1$ 。

不平衡且含有 n 次谐波的电网电压经过坐标变换到双同步旋转坐标系下, 可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{dq^+} = \begin{bmatrix} u_{d^+} \\ u_{q^+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{d^+} \\ U_{q^+} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{d^+}^{(-1)} \\ u_{q^+}^{(-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{d^+}^{(n)} \\ u_{q^+}^{(n)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{u}_{dq^-} = \begin{bmatrix} u_{d^-} \\ u_{q^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{d^-} \\ U_{q^-} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{d^-}^{(+1)} \\ u_{q^-}^{(+1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{d^-}^{(n)} \\ u_{q^-}^{(n)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } \begin{bmatrix} U_{d^+} \\ U_{q^+} \end{bmatrix} &= U^{(+1)} \begin{bmatrix} \cos \phi^{(+1)} \\ \sin \phi^{(+1)} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} u_{d^+}^{(-1)} \\ u_{q^+}^{(-1)} \end{bmatrix} = \\ &U^{(-1)} \begin{bmatrix} \cos [-2\omega t + \phi^{(-1)}] \\ \sin [-2\omega t + \phi^{(-1)}] \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} u_{d^+}^{(n)} \\ u_{q^+}^{(n)} \end{bmatrix} = \\ &U^{(n)} \begin{bmatrix} \cos [(n-1)\omega t + \phi^{(n)}] \\ \sin [(n-1)\omega t + \phi^{(n)}] \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} U_{d^-} \\ U_{q^-} \end{bmatrix} = U^{(-1)} \begin{bmatrix} \cos \phi^{(-1)} \\ \sin \phi^{(-1)} \end{bmatrix}; \\ &\begin{bmatrix} u_{d^-}^{(+1)} \\ u_{q^-}^{(+1)} \end{bmatrix} = U^{(+1)} \begin{bmatrix} \cos [2\omega t + \phi^{(+1)}] \\ \sin [2\omega t + \phi^{(+1)}] \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} u_{d^-}^{(n)} \\ u_{q^-}^{(n)} \end{bmatrix} = \\ &U^{(n)} \begin{bmatrix} \cos [(n+1)\omega t + \phi^{(n)}] \\ \sin [(n+1)\omega t + \phi^{(n)}] \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由式(2)可知, 在双同步参考坐标系变换得到的 d, q 轴分量中, 除了直流分量还包含 2 倍频和谐波分量。

2 基于 SOGI 的新型 PLL

利用 SOGI 的正交特性和频率特性, 可消除 dq 轴上电压 2 倍频振荡和谐波分量的影响, 以提取出 dq 轴的电压直流分量。

2.1 基于 SOGI 的正交信号发生器

基于 SOGI 的正交信号发生器^[10] (SOGI-QSG) 如图 2 所示。

图 2 中, u 为输入信号, u' 、 qu' 为输出信号, 其传递函数为

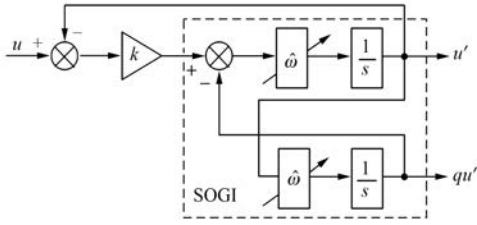


图2 SOGI-QSG

$$\begin{cases} D(s) = \frac{u'(s)}{u(s)} = \frac{k\hat{\omega}s}{s^2 + k\hat{\omega}s + \hat{\omega}^2} \\ Q(s) = \frac{qu'(s)}{u(s)} = \frac{k\hat{\omega}^2}{s^2 + k\hat{\omega}s + \hat{\omega}^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为系统增益; $\hat{\omega}$ 为谐振频率。

该系统实际上是一种基于 SOGI 的自适应滤波器。若输入信号 u 是频率为 ω 的正弦信号, 由系统的频率特性可知输出信号 u' 和 qu' 的相位差为 90° , 与 k 、 ω 、 $\hat{\omega}$ 的取值无关, 即输出信号 u' 和 qu' 正交。当输入信号为直流量时, $u' = 0$, $qu' = ku$; 当输入频率 $\omega = \hat{\omega}$ 时, u 和 u' 相等, u' 和 qu' 正交, 系统可实现对频率为 $\hat{\omega}$ 的正弦给定信号无静差跟踪。当输入频率 $\omega \neq \hat{\omega}$ 时, 输出信号的幅值和相位均会出现跟踪误差, 正交发生器表现出滤波特性, 谐波次数越高, 滤波效果越好。因此, 即使在电压畸变等非理想情况下, 系统仍具有良好的性能。将 PLL 得到的频率作为 SOGI 的谐振频率, 可以实现频率自适应的功能。

2.2 2 倍频波动的消除

将式(2)所得的 dq 轴电压分量作为 SOGI-QSG 的输入信号, 并将谐振频率设为 2ω , 则由 SOGI-QSG 的传递函数可得 SOGI-QSG 的输出信号为

$$\begin{cases} u'_{d+} = u_{d+}^{(-1)} + u_{d+}^{*(n)} \\ qu'_{d+} = kU_{d+} - u_{q+}^{(-1)} + \frac{2}{n-1}u_{q+}^{*(n)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u'_{q+} = u_{q+}^{(-1)} + u_{q+}^{*(n)} \\ qu'_{q+} = kU_{q+} + u_{d+}^{(-1)} - \frac{2}{n-1}u_{d+}^{*(n)} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $u_{d+}^{*(n)} = |D|_{(n-1)\omega} U^{(n)} \cos[(n-1)\omega t + \phi^{(n)} + \angle D_{(n-1)\omega}]$; $u_{q+}^{*(n)} = |D|_{(n-1)\omega} U^{(n)} \sin[(n-1)\omega t + \phi^{(n)} + \angle D_{(n-1)\omega}]$; $|D|$ 为传递函数 $D(s)$ 的幅值; $\angle D$ 为传递函数 $D(s)$ 的相角。

$$\begin{cases} u'_{d-} = u_{d-}^{(+1)} + u_{d-}^{*(n)} \\ qu'_{d-} = kU_{d-} + u_{q-}^{(+1)} + \frac{2}{n+1}u_{q-}^{*(n)} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u'_{q-} = u_{q-}^{(+1)} + u_{q-}^{*(n)} \\ qu'_{q-} = kU_{q-} - u_{d-}^{(+1)} - \frac{2}{n+1}u_{d-}^{*(n)} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $u_{d-}^{*(n)} = |D|_{(n+1)\omega} U^{(n)} \cos[(n+1)\omega t + \phi^{(n)} + \angle D_{(n+1)\omega}]$; $u_{q-}^{*(n)} = |D|_{(n+1)\omega} U^{(n)} \sin[(n+1)\omega t + \phi^{(n)} + \angle D_{(n+1)\omega}]$ 。

由式(4)~式(7)可知, 将 dq 轴分量作为 SOGI 给定信号, 将谐振频率设置为 2ω , 利用 SOGI 频率自适应功能, 输出信号中 2 倍频分量不变, 谐波分量幅值和相位发生了变化, 但频率不变。将式(2)中的 u_{d+} 、 u_{q+} 、 u_{d-} 、 u_{q-} 分别与式(4)~式(7)中的 u'_{d+} 、 u'_{q+} 、 u'_{d-} 、 u'_{q-} 相减, 可得:

$$\begin{cases} u_{d+}^* = U_{d+} + u_{d+}^{(n)} - u_{d+}^{*(n)} \\ u_{q+}^* = U_{q+} + u_{q+}^{(n)} - u_{q+}^{*(n)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_{d-}^* = U_{d-} + u_{d-}^{(n)} - u_{d-}^{*(n)} \\ u_{q-}^* = U_{q-} + u_{q-}^{(n)} - u_{q-}^{*(n)} \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知, 相减后的信号中只包含直流分量和谐波交流分量, 消除了 2 倍频分量。2 倍频分量消除模块如图 3 所示。

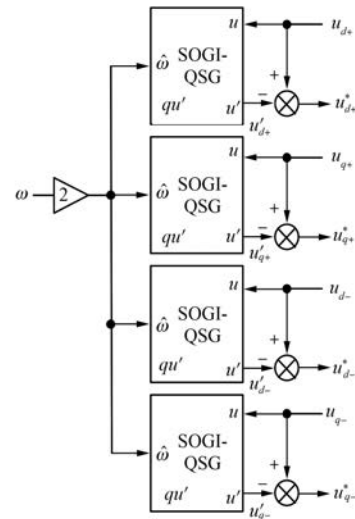


图3 2 倍频分量消除模块

2.3 低次谐波的抑制

消除了 2 倍频分量的信号后还含有谐波分量, 为了能准确地提取出直流分量, 需要抑制谐波尤其是低次谐波分量。由前面的推导可以看出,

与输入信号相比,谐波分量经过 SOGI 产生的输出信号发生了相位和幅值的变化,但是频率并未发生改变。如需进一步消除第 n 次谐波,可采用 2 倍频消除方法,将谐振频率分别设置为 $(n-1)\omega$ 、 $(n+1)\omega$,谐波分量消除模块如图 4 所示。

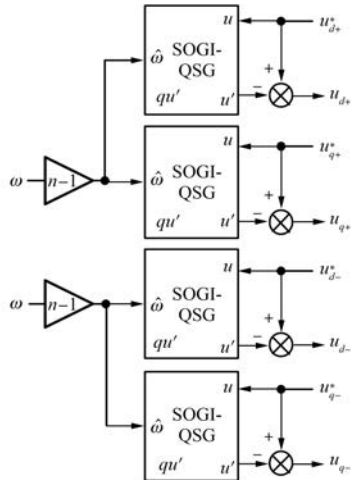


图 4 谐波分量消除模块

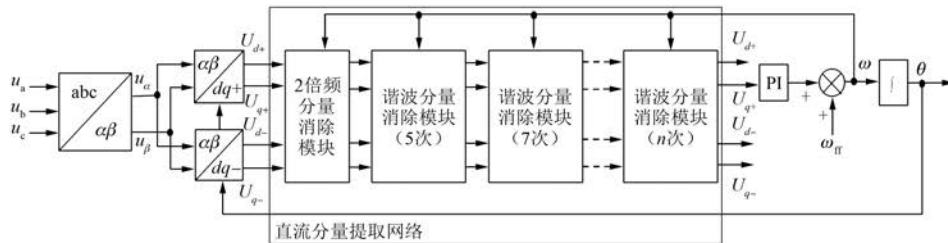


图 5 基于 SOGI 的 PLL

仿真故障设置如下: $t=0.60$ s 时,电网电压发生单相跌落,即 A 相跌落 50%; $t=0.75$ s 时, A 相跌落 50% 的同时又向三相电压中注入了峰值为 0.20 p.u. 的 5 次谐波、0.10 p.u. 的 7 次谐波和 0.05 p.u. 的 11 次谐波。新型 PLL 仿真波形如图 6 所示。

由图 6 可以看出,在电压不平衡和谐波畸变的情况下,在电压的半个周期时间内,新型 PLL 的正、负序分量和频率输出基本稳定;在低次谐波含量大的情况下能快速而准确地分离量出基波的正、负分量,实现电网电压的同步。

4 试验验证

通过试验进一步验证所提同步信号检测方法的有效性。试验装置采用 TI 公司的数字信号处理器 (DSP) TMS320F2812,实现信号采样和数字运算,采样频率为 2 kHz。

2.4 基于 SOGI 的 PLL 原理与结构

在双同步参考坐标系下,设计了一种基于 SOGI 的新型 PLL,将 SOGI 构成的消除 2 倍频和谐波交流分量模块替代 DDSRF-PLL 中的解耦网络,如图 5 所示。直流分量提取网络利用 SOGI-QSG 的正交和频率特性,首先采用图 3 的 2 倍频消除模块消除 2 倍频分量;然后根据需要消除的谐波次数,设定图 4 的谐波消除模块。因为谐波分量经过 SOGI 后频率没有发生改变,所以各次谐波消除模块采用顺序级联结构即可依次消除各次谐波。最后,通过闭环控制将 q^+ 轴变量控制为零,从而实现锁相。

3 仿真分析

为了验证本文所提新型同步信号检测方法的正确性和有效性,利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,对电网电压不平衡和谐波畸变情况下基波电压同步信号提取进行仿真。

SOGI 在 DSP 中的实现采用双线性变换法进行离散化^[13]。离散后的 SOGI 传递函数为

$$D(z) = \frac{b_0(1 - z^{-2})}{1 - a_1z^{-1} - a_2z^{-2}} \quad (10)$$

$$Q(z) = \frac{\lambda b_0(1 + 2z^{-1} + z^{-2})}{1 - a_1z^{-1} - a_2z^{-2}} \quad (11)$$

其中: $b_0 = \frac{x}{x+y+4}$; $a_1 = \frac{8-2y}{x+y+4}$; $a_2 = \frac{x-y-4}{x+y+4}$; $\lambda = 0.5\hat{\omega}T$; $x = 2k\hat{\omega}T$; $y = (\hat{\omega}T)^2$; T 为采样频率。

迭代递推公式为

$$\begin{cases} u'_o(n) = a_1u'_o(n-1) + a_2u'_o(n-2) + \\ b_0u(n) - b_0u(n-2) \\ qu'_o(n) = a_1qu'_o(n-1) + a_2qu'_o(n-2) + \\ \lambda b_0u(n) + 2\lambda b_0u(n-1) + \lambda b_0u(n-2) \end{cases} \quad (12)$$

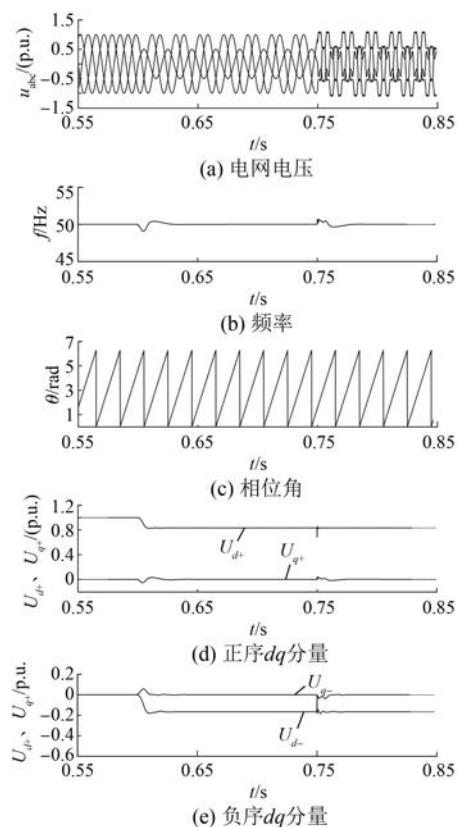


图6 电网电压不平衡和谐波畸变时同步信号检测仿真波形

式中: u 为 SOGI 给定输入信号; u'_o, qu'_o 为 SOGI 输出信号。

由于试验设备有限,三相不平衡和畸变的电网电压的 A/D 采样值通过数值信号产生。试验设定的电网电压故障情况与仿真相同,电网电压在 $t=0.02\text{ s}$ 处 A 相单相跌落 50%, $t=0.10\text{ s}$ 时,在 A 相单相跌落了 50% 的基础上注入峰值为 0.20 p.u. 的 5 次谐波、0.10 p.u. 的 7 次谐波和 0.05 p.u. 的 11 次谐波,电压波形如图 7(a) 所示。

同步信号提取算法由 DSP 实现,并利用 DSP 集成开发系统(CCS)的实时图形观测窗口监测试验结果。电网电压故障下 DDSRF-PLL 和新型 PLL 频率估计的试验波形如图 7(b)、图 7(c) 所示。由图 7(b)、图 7(c) 可以看出,电网电压发生不对称故障时,DDSRF-PLL 和新型 PLL 均能准确地提取基波频率信号。当电网电压含有较多低次谐波的时候,DDSRF-PLL 提取的频率出现波动,如需进一步滤除低次谐波的影响还需再另加低通滤波器,这必然会进一步降低系统的动态性能;新型

PLL 频率提取不受谐波影响,在含有较多低次谐波的情况下仍然能快速准确地提取基波频率信号。

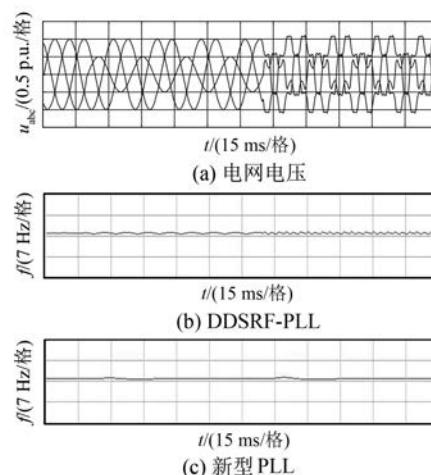


图7 电网电压不对称且畸变情况下 2 种 PLL 的频率估计

电网电压不平衡和畸变情况下新型 PLL 的相位检测误差、相位以及正、负序 dq 轴电压直流分量的试验波形如图 8 所示。从图 8 可以看出,

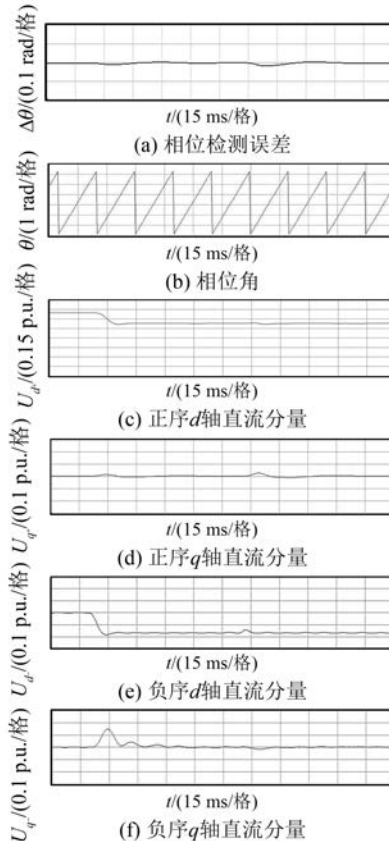


图8 电网电压不平衡和谐波畸变时的试验波形

双同步参考坐标系下基于 SOGI 的 PLL 在电网电压不对称和畸变情况下, 响应速度快, 不需使用额外的滤波器就可消除低次谐波对 dq 轴电压直流信号提取的影响, 较好地实现了基波信号的提取, 快速有效地分离出正序和负序分量。试验波形与仿真波形吻合。

5 结 语

本文在双同步参考坐标系和 SOGI 特性的基础上, 针对电网电压不平衡和谐波畸变, 特别是低次谐波含量较大的情况, 提出了一种基于 SOGI 新型同步信号检测方法。该方法利用 SOGI 频率自适应和正交特性, 消除了 d 、 q 轴分量中的 2 倍频谐波交流分量。仿真和试验结果表明, 该电网电压同步信号检测方法能快速而准确地提取电网电压的频率、相位和正负分量, 为电网故障下风力发电系统网侧变换器提供可靠的电网同步信息。

【参 考 文 献】

- [1] PETEIRA H A, CUPERTINO A F, RIBEIRO C A D S G, et al. Influence of PLL in wind parks harmonic emissions[C]//2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 2013.
- [2] 邓秋玲, 姚建刚, 黄守道, 等. 直驱永磁风力发电系统可靠性技术研究综述[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 144.
- [3] 杜雄, 王国宁, 孙鹏菊, 等. 两相静止坐标系下消除不对称和谐波影响的同步信号提取方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 249.
- [4] RODRIGUEZ P, LUNA A, MUNOZ-AGUILAR R S, et al. A stationary reference frame grid synchronization system for three-phase grid-connected power converters under adverse grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 99.
- [5] 王颢雄, 马伟明, 肖飞, 等. 双 dq 变换软件锁相环的数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 237.
- [6] CHUNG S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3): 431.
- [7] NOURALINEJAD A, BAGHERI A, MARDANEH M, et al. Improving the decoupled double SRF PLL for grid connected power converters [C]//The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), 2014.
- [8] GOLESTAN S, RAMEZANI M, GUERRERO J M, et al. dq -frame cascaded delayed signal cancellation-based PLL: analysis, design, and comparison with moving average filter-based PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1618.
- [9] 陈明亮, 肖飞, 刘勇, 等. 一种正负序分离锁相环及其在并网型风力发电系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 181.
- [10] 邓秋玲, 彭晓, 张桂湘. 电网故障下直驱风电系统网侧变流器的电网同步化技术[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1473.
- [11] 杜雄, 郭宏达, 孙鹏菊, 等. 基于 ANF-PLL 的电网电压基波正负序分离方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 33(27): 28.
- [12] 李建霞, 闫朝阳, 白鹤, 等. 一种基于 2 倍频锁相的锁相环技术及并网应用[J]. 电气传动, 2017, 47(5): 33.
- [13] 薛尚青, 蔡金锭. 基于二阶广义积分器的基波正负序分量检测方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 69.
- [14] RODRIGUEZ P, LUNA A, CANDELA I, et al. Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127.
- [15] 李珊瑚, 杜雄, 王莉萍, 等. 解耦多同步参考坐标系电网电压同步信号检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 183.
- [16] 乔和, 张文斌, 于浩, 等. 非理想条件下的电网同步锁相技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(7): 98.
- [17] 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.