

基于固定频率二阶广义积分器的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法

张爽¹, 刘海涛¹, 牛健¹, 赫嘉楠¹, 王云鹏², 李国胜³

(1. 宁夏电力有限公司 电力科学研究院, 宁夏 银川 750000; 2. 山东容弗新信息科技有限公司, 山东 济南 250000; 3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 针对电网存在频率突变、直流分量和多次谐波时传统 i_p-i_q 算法谐波检测精度不高的问题, 提出一种基于固定频率二阶广义积分器的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法。该算法首先利用改进型固定频率二阶广义积分器滤除电网中直流成分和多次谐波, 并克服传统二阶广义积分器产生的正交信号不等幅问题; 然后利用一种基于改进型固定频率二阶广义积分器的锁相环提供更准确的电网频率, 从而得到更准确的检测效果。最后, 仿真算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 二阶广义积分器; 改进型固定频率二阶广义积分器; i_p-i_q 算法; 谐波检测

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22067

Improved i_p-i_q Harmonic Detection Algorithm Based on Frequency-fixed Second Order Generalized Integrator

ZHANG Shuang¹, LIU Haitao¹, NIU Jian¹, HE Jianan¹, WANG Yunpeng², LI Guosheng³

(1. Power Research Institute, State Grid Ningxia Power Co., Ltd., Yinchuan 750000, Ningxia, China;
2. Shandong Roof Innovation Technology Co., Ltd., Jinan 250000, Shandong, China;
3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: To solve the problem that the accuracy of traditional i_p-i_q algorithm is not high when there are frequency mutation, DC component and multiple harmonics in the power grid, an improved i_p-i_q algorithm based on frequency-fixed second order generalized integrator (SOGI) was proposed. Firstly, the improved frequency-fixed second order generalized integrator was used to filter the DC component and multiple harmonics in the power grid, and unequal amplitude problem of the orthogonal signal generated by the traditional second order generalized integrator was overcome. Secondly, a phase locked loop (PLL) based on the improved frequency-fixed second order generalized integrator was used to provide more accurate power grid frequency, so as to obtain more accurate detection effect. Finally, a simulation example verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: second order generalized integrator (SOGI); improved frequency-fixed second order generalized integrator (IFFSOGI); i_p-i_q algorithm; harmonic detection

随着我国电力行业的快速发展,以风电和光伏为代表的大规模新能源并入电网,以及大量的非线性大容量电力电子设备的投入使用,给常规电力系统稳定性、可靠性等带来严重的挑战,其

中给电能质量领域带来了丰富的谐波干扰就是其中之一^[1]。对谐波准确检测是一切谐波研究工作的前提^[2],因此,对谐波检测算法进行研究具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877039)

作者简介: 张爽(1981—),男,本科,教授级高级工程师,Email: 1759610092@qq.com

目前,常用的谐波检测方法主要有:基于快速傅里叶变换和小波变换的谐波检测算法、基于神经网络的智能谐波检测算法、基于希尔伯特黄变换的谐波检测算法、基于瞬时无功理论的谐波检测算法等。快速傅里叶变换只能检测稳态谐波,无法对暂态谐波进行检测,另外存在频谱泄漏等问题^[3-4];小波变换虽然能够对谐波进行时频分析,但实现较为复杂^[5];神经网络算法虽然检测精度高,但大多依靠经验对网络进行训练^[6];希尔伯特黄变换能够对暂态谐波进行分析,但也存在模态混叠和端点效应等缺陷^[7];基于瞬时无功理论的谐波检测算法在实际使用中实现简单,能够对谐波实时检测,目前在电力系统领域中广泛应用^[8]。传统基于瞬时无功的谐波检测算法受锁相环(phase-locked loop, PLL)提供的频率精度和低通滤波器(low-pass filter, LPF)滤波效果的影响^[9]。文献[10]提出一种可以检测出三相电路中各个频段的正序和负序谐波的 i_p-i_q 谐波检测算法,可以弥补传统 i_p-i_q 法的不足。文献[11]提出了一种无锁相环的 i_p-i_q 谐波检测方法,但添加了锁频环结构,并未从根本上实现无锁相锁频结构。文献[12]提出一种基于改进二阶广义积分器(second order generalized integrator, SOGI)的 i_p-i_q 谐波检测算法,利用SOGI的滤波特性为 i_p-i_q 提供更准确的电压频率,但SOGI在电网频率突变时输出正交信号不等幅,容易使锁相过程出现偏差。

本文利用改进型固定频率的二阶广义积分器(improved frequency-fixed second order generalized integrator, IFFSOGI)与传统 i_p-i_q 谐波检测算法相组合,提出了一种基于固定频率二阶广义积分器的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法。IFFSOGI不仅具有良好的带通滤波器特性,还能够克服传统二阶广义积分器输出正交信号不等幅问题,该算法利用IFFSOGI滤除电网中直流成分和多次谐波,并利用IFFSOGI构成的锁相环准确锁定电网频率,从而 i_p-i_q 检测到更准确的谐波信息。最后,仿真算例验证了所提谐波检测算法的有效性。

1 基于改进型固定频率二阶广义积分器的锁相环

1.1 二阶广义积分器

图1为二阶广义积分器(SOGI)的基本结构

原理, U_g 为电网电压, ω' 为估计电网角频率, k 为控制增益, U_α 和 U_β 为一组正交信号。由图1可知,估计的电网频率 ω' 实时反馈给SOGI,从而实现频率自适应。

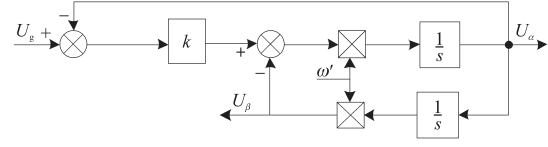


图1 二阶广义积分器结构图

Fig.1 Structure diagram of SOGI

SOGI的传递函数为

$$\begin{cases} D_1(s) = \frac{U_\alpha}{U_g} = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \\ Q_1(s) = \frac{U_\beta}{U_g} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $U_g = U_p \sin(\omega t) = U_p \sin(\theta)$

式中: U_p 为电压幅值; ω 为电压角频率; θ 为电压相位。

为了便于分析,令 $U_p=1$,可得到:

$$\begin{cases} U_\alpha(t) = \frac{k\omega'\omega}{\sqrt{k^2\omega'^2\omega^2 + (\omega'^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t - \delta) - \\ A \sin\left(\sqrt{1 - \left(\frac{k}{2}\right)^2} \omega' t - \varphi_1\right) e^{-\frac{k\omega' t}{2}} \\ U_\beta(t) = \frac{-k\omega'^2}{\sqrt{k^2\omega'^2\omega^2 + (\omega'^2 - \omega^2)^2}} \cos(\omega t - \delta) - \\ B \cos\left(\sqrt{1 - \left(\frac{k}{2}\right)^2} \omega' t - \varphi_2\right) e^{-\frac{k\omega' t}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$A = \frac{k\omega\sqrt{4(4-k^2)(\omega^2 - \omega'^2)^2\omega'^2 + [2k\omega'(\omega^2 - \omega'^2) + 4k\omega'^3]^2}}{[k^2\omega'^4(4-k^2) + (k^2\omega'^2 - 2\omega'^2 + 2\omega'^3)^2] \sqrt{1 - \left(\frac{k}{2}\right)^2}}$$

$$B = \frac{2k\omega\omega'}{\sqrt{k^2\omega'^4(4-k^2) + (k^2\omega'^2 - 2\omega'^2 + 2\omega'^3)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{k}{2}\right)^2}}$$

$$\sin(\delta) = \frac{\omega^2 - \omega'^2}{\sqrt{k^2\omega'^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega'^2)^2}}$$

$$\tan(\varphi_1) = \frac{(\omega^2 - \omega'^2)\sqrt{4-k^2}}{k(\omega^2 - \omega'^2) + 2k\omega'^2}$$

$$\tan(\varphi_2) = \frac{k^2\omega'^2 - 2\omega'^2 + 2\omega'^3}{2k\omega'^2 \sqrt{1 - \left(\frac{k}{2}\right)^2}}$$

式中: δ 为电压相位差。

当 $\omega'=\omega$ 时,式(2)可写成:

$$\begin{cases} U_\alpha(t) = \sin(\omega t) - \frac{\sin(\sqrt{1 - (\frac{k}{2})^2} \omega t) e^{-\frac{k\omega t}{2}}}{\sqrt{1 - (\frac{k}{2})^2}} \\ U_\beta(t) = -\cos(\omega t) - \frac{\cos(\sqrt{1 - (\frac{k}{2})^2} \omega t - \varphi_2) e^{-\frac{k\omega t}{2}}}{\sqrt{1 - (\frac{k}{2})^2}} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,当 $t \rightarrow \infty$,第二项衰减至0,仅剩第一项,说明稳态时 SOGI 输出信号与电网电压同频率且互相正交。

由式(2)可知,当 $\omega' \neq \omega$ 时,意味着估计电网频率与真实电网频率出现偏差,导致 SOGI 输出信号 U_α 和 U_β 幅值不再相等,稳态时, $|U_\alpha| = \frac{\omega}{\omega'} |U_\beta|$,从而锁相环锁相出现误差。

1.2 固定频率二阶广义积分器

为克服 SOGI 的不足,采用的固定频率的二阶广义积分器(frequency-fixed second order generalized integrator, FFSOGI)结构图如图2所示。在图2中, ω_0 为谐振角频率,一般取 $\omega_0=100\pi$,从而实现 FFSOGI 与锁相环解耦。

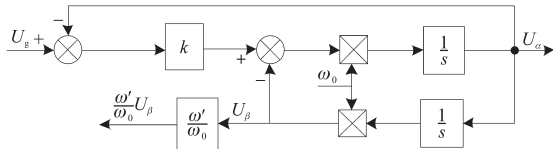


图2 固定频率二阶广义积分器结构图
Fig.2 Structure diagram of FFSOGI

FFSOGI的传递函数为

$$\begin{cases} D_2(s) = \frac{U_\alpha}{U_g} = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \\ Q_2(s) = \frac{U_\beta}{U_g} \cdot \frac{\omega'}{\omega_0} = \frac{k\omega_0 \omega'}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)可得 FFSOGI 输出正交信号为

$$\begin{cases} U_\alpha(t) = \frac{k\omega_0 \sin(\omega t - \delta)}{\sqrt{k^2 \omega_0^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \\ U_\beta'(t) = \frac{\omega'}{\omega_0} U_\beta(t) = \frac{-k\omega' \omega_0 \cos(\omega t - \delta)}{\sqrt{k^2 \omega_0^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \\ \sin(\delta) = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\sqrt{k^2 \omega_0^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,稳态时, $\omega' \approx \omega$,FFSOGI 输出正交信号幅值始终相等,从而保证锁相环锁相正确。

1.3 改进型固定频率二阶广义积分器

FFSOGI 是在传统 SOGI 模块基础上改进而来,所以 FFSOGI 不可避免只能滤除信号中高次谐波,仍受到电网直流成分和低次谐波的影响,因此提出一种改进型固定频率二阶广义积分器(improved frequency-fixed second order generalized integrator, IFFSOGI),其结构如图3所示。

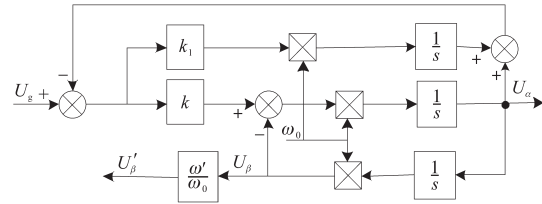


图3 改进型固定频率二阶广义积分器结构图
Fig.3 Structure diagram of IFFSOGI

由图3可知,改进型 FFSOGI 在 SOGI 模块内部添加了一个控制回路,该控制回路由控制参数 k_1 来调节,该回路与 SOGI 模块配合工作。

IFFSOGI 的传递函数为

$$\begin{cases} D_3(s) = \frac{U_\alpha}{U_g} = \frac{k\omega_0 s^2}{s^3 + (k_1 + k)\omega_0 s^2 + \omega_0^2 s + k_1 \omega_0^3} \\ Q_3(s) = \frac{U_\beta'}{U_g} = \frac{k\omega_0 \omega' s}{s^3 + (k_1 + k)\omega_0 s^2 + \omega_0^2 s + k_1 \omega_0^3} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)对应的幅频特性如图4、图5所示

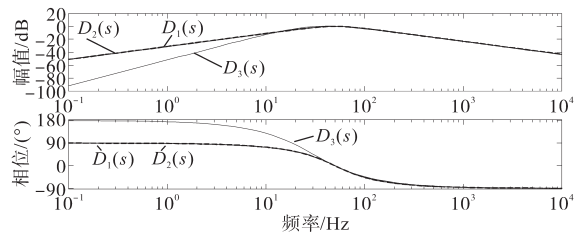


图4 $D(s)$ 幅频特性曲线

Fig.4 Amplitude frequency characteristic curves of $D(s)$

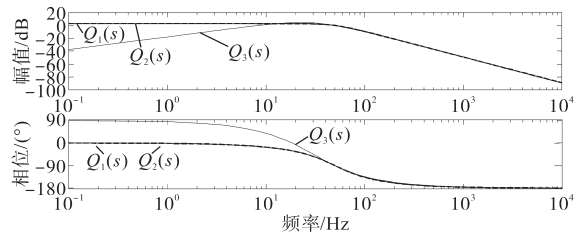


图5 $Q(s)$ 幅频特性曲线

Fig.5 Amplitude frequency characteristic curves of $Q(s)$

由图4可知, $D_1(s)$, $D_2(s)$ 和 $D_3(s)$ 均表现出带通滤波特性, $D_1(s)$ 和 $D_2(s)$ 幅频特性曲线重合,三者都能滤除信号中的直流成分和各次谐波,其中 $D_3(s)$ 在低频段负数增益大于 $D_1(s)$ 和 $D_2(s)$,说明滤除直流成分和低次谐波能力优于其他两种传递函数。在图5中, $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$ 仅表现出低通

滤波特性,无法将直流成分和低次谐波进行滤除, $Q_3(s)$ 表现出带通滤波特性,不仅有 $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$ 相同的滤除高次谐波能力,也具有良好地滤除直流成分和低次谐波能力,验证了IFFSOGI良好的带通滤波特性。

根据文献[12]可知,在传统SOGI中,参数 k 一般取 $\sqrt{2}$ 。借鉴文献[13]的思想,可根据传递函数幅频特性曲线确定 k_1 的值,在谐振角频率 $\omega_0=100\pi$ 处作出不同 k_1 时 $D_3(s)$ 的幅频特性曲线,如图6所示。

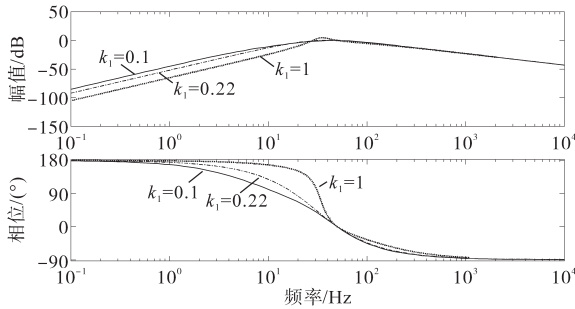


图6 $D_3(s)$ 幅频特性曲线

Fig.6 Amplitude frequency characteristic curves of $D_3(s)$

由图6可知, k_1 影响 $D_3(s)$ 低频段负数增益,其值越大,负数增益越大,直流抑制能力越强,但也在工频处产生正数增益,影响基波幅值。因此 k_1 值需要折中考虑,本文取 $k_1=0.22$ 。

1.4 基于改进型固定频率二阶广义积分器的锁相环

基于IFFSOGI的锁相环结构如图7所示。与传统锁相环相比,IFFSOGI-PLL利用IFFSOGI对电压信号进行滤波处理,滤除信号中的直流成分和各次谐波,为基于同步坐标系的锁相环(synchronous reference frame-phase locked loop, SRF-PLL)提供准确的正交信号,最后利用SRF-PLL进行准确锁相。

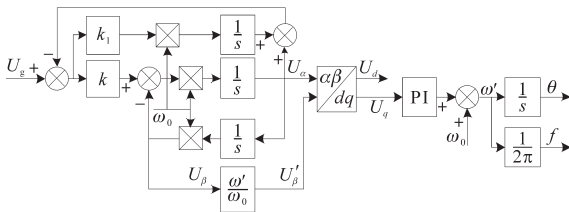


图7 IFFSOGI-PLL结构图

Fig.7 Structure diagram of IFFSOGI-PLL

2 基于IFFSOGI的 i_p-i_q 谐波检测算法

2.1 传统 i_p-i_q 谐波检测算法

传统 i_p-i_q 谐波检测算法采用SRF-PLL对电网

电压进行锁相,为其提供角频率,同时利用LPF滤除信号中的高次谐波,最后利用电网三相电流与基本电流做差得到电网谐波电流。其结构如图8所示。

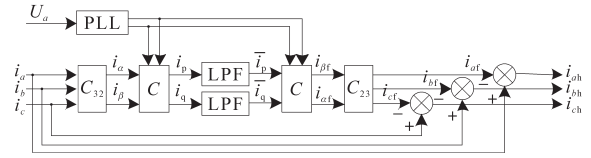


图8 传统 i_p-i_q 谐波检测算法结构图

Fig.8 Structure chart of traditional i_p-i_q harmonic detection algorithm

在传统 i_p-i_q 谐波检测算法中,检测效果一般取决于PLL锁相精度和LPF滤波效果,当电网质量复杂时,例如电网频率突变、含直流成分和多次谐波,PLL锁相将会出现误差,LPF也不能滤除直流成分和低次谐波,将严重影响 i_p-i_q 谐波检测算法的检测效果。

2.2 基于IFFSOGI的 i_p-i_q 谐波检测算法

本文利用IFFSOGI-PLL为 i_p-i_q 法提供更准确的电网频率,精确锁相电网电压相位,同时利用IFFSOGI滤除信号中的直流成分和各次谐波,得到更准确的基波电流信号,最后电网三相电流与基波电流相减,得到电网中谐波信号。所提出的 i_p-i_q 谐波检测算法结构如图9所示。

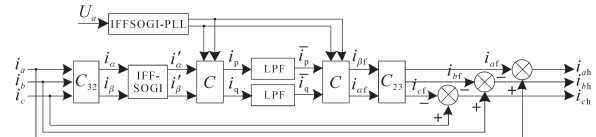


图9 基于IFFSOGI的 i_p-i_q 谐波检测算法结构图

Fig.9 i_p-i_q harmonic detection algorithm structure chart based on IFFSOGI

3 仿真分析

为验证本文所提方法的有效性,在Matlab/Simulink中搭建IFFSOGI-PLL和基于IFFSOGI改进型 i_p-i_q 谐波检测算法模型,分别在电网频率突变、电网含直流成分和多次谐波等条件下与SOGI-PLL和传统 i_p-i_q 法进行对比研究。

为验证电网频率突变时IFFSOGI的有效性和IFFSOGI-PLL锁相效果,在时间为0.2s时电网电压频率突变至60Hz,仿真结果如图10所示。由图10a、图10b可知,在电网频率突变时,SOGI输出正交信号幅值并不相等,而IFFSOGI能够输出幅值相等的正交信号,从而验证了IFFSOGI的有效性。由图10c可知,在电网频率突变时,SO-

GI-PLL 输出频率在 11.4 ms 内首次达到 60 Hz, 在 20 ms 内达到峰值, 超调量为 4.13%, 在 53 ms 内频率恢复稳定, 频率误差为 0。IFFSOGI-PLL 输出频率在 8.8 ms 内首次达到 60 Hz, 在 11.8 ms 内达到峰值, 超调量为 1.47%, 在 27 ms 内频率恢复稳定, 频率误差为 0。因此, IFFSOGI-PLL 动态响应速度较好, 产生的超调量更小, 能准确锁相。

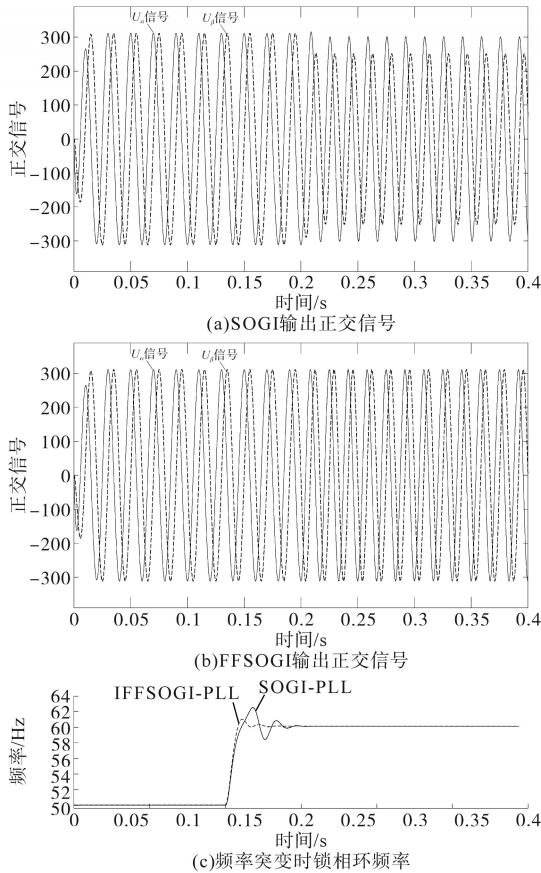


图10 频率突变时仿真结果

Fig.10 Simulation results with frequency mutation

为验证在含直流成分时基于 IFFSOGI 的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法的有效性, 向电网中注入 10% 的直流电压、10 A 直流电流, 仿真结果如图 11 所示。由图 11a 可知, 电网含有直流成分时, SRF-PLL 和 SOGI-PLL 输出频率发生振荡, 无法准确锁定电网频率, IFFSOGI-PLL 能够在 55 ms 内快速锁定电网频率。由图 11b、图 11c 可知, 电网电流中含有多次谐波和直流成分, 波形畸变率 THD 为 25.03%, 电流波形发生严重畸变。由图 11d 和图 11e 可知, 传统 i_p-i_q 法能够滤除电流中的部分高次谐波, 输出波形中含有直流成分和多次谐波, 波形畸变率 THD 为 6.96%, 输出电流越靠近

基波, 最后与电网三相电流做差得到的谐波才能更准确, 说明谐波检测效果越好, 基于 IFFSOGI 的改进型 i_p-i_q 法输出电流波形畸变率仅为 0.17%, 且直流成分和各次谐波几乎滤除, 因此验证了所提方法的优越性。

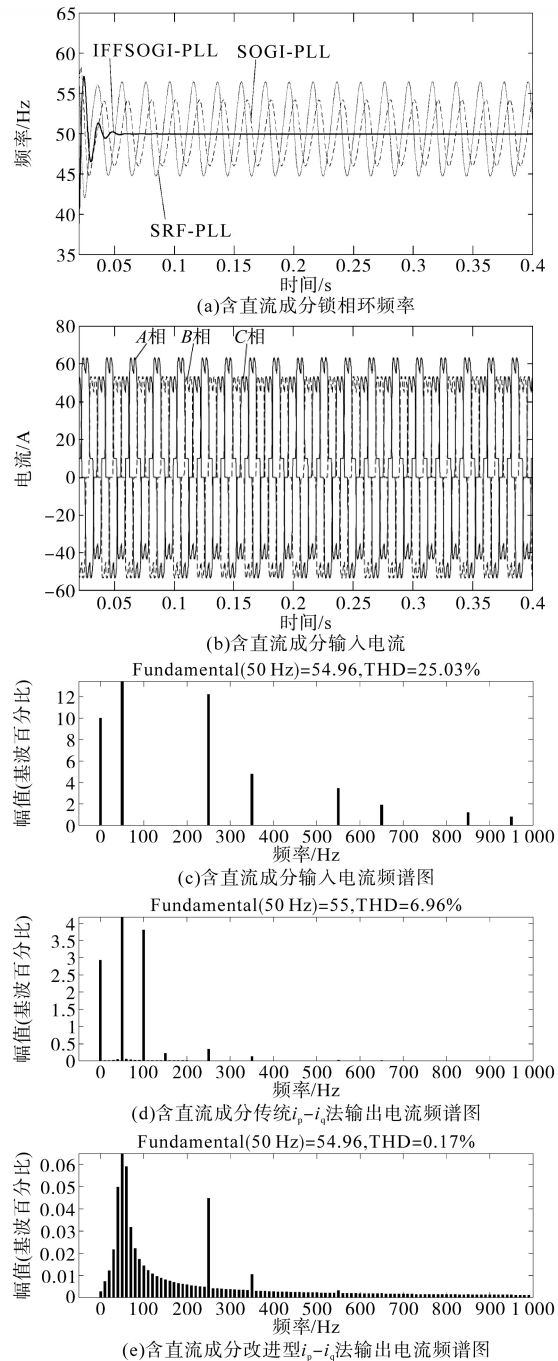


图11 含直流成分时仿真结果

Fig.11 Simulation results with DC component

为验证在含多次谐波时基于 IFFSOGI 的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法的有效性, 向电网 A 相电压注入 5% 的 5 次正序谐波和 B 相电压注入 5% 的 7 次正序谐波, 仿真结果如图 12 所示。

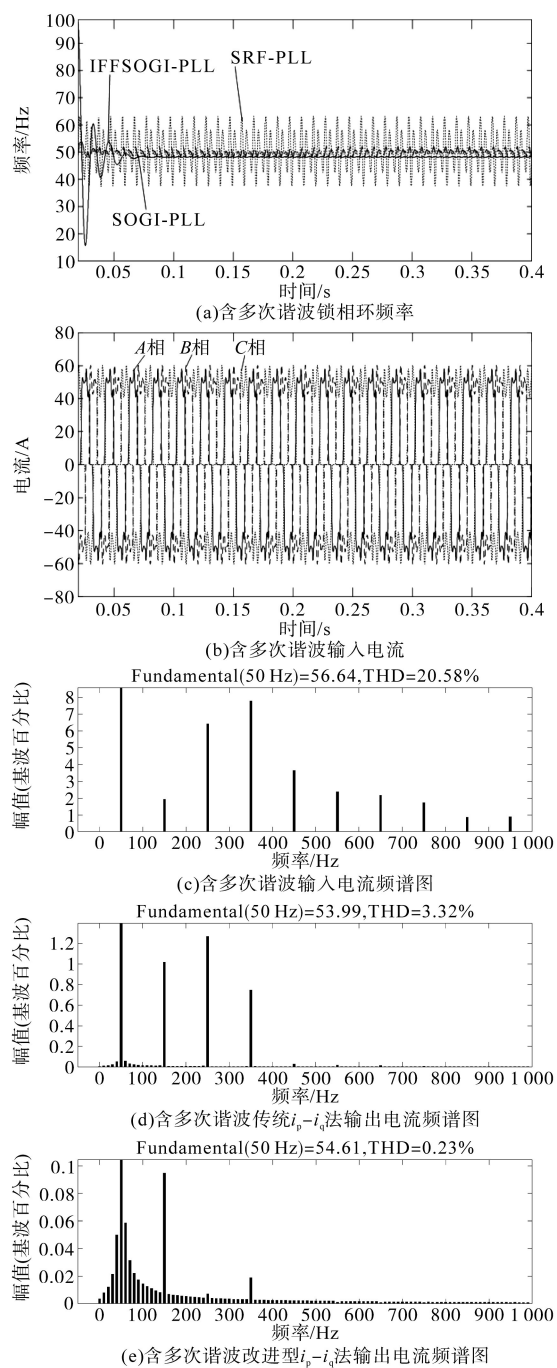


图12 含多次谐波时仿真结果

Fig.12 Simulation results with multiple harmonics

由图12a可知,电网含有多次谐波时,SRF-PLL和SOGI-PLL输出频率发生振荡,其中SRF-PLL振荡更为严重,IFFSOGI-PLL能够在80ms内快速锁定电网频率,受电网谐波影响较小。由图12b、图12c可知,电网电流中含有多次谐波时,三相电流波形均发生严重畸变,波形畸变率为20.58%。由图12d、图12e可知,传统 i_p-i_q 法输出波形中仍含有多次谐波,波形畸变率THD为3.32%,基于IFFSOGI的改进型 i_p-i_q 法输出电流波

形畸变率仅为0.23%,且各次谐波几乎滤除,因此验证了所提方法的优越性。

图10~图12仿真实验波形表明:

1) 频率突变时,SOGI-PLL和IFFSOGI-PLL均能锁定电网频率,但是IFFSOGI-PLL锁相调节时间更短、动态响应更快、超调量更小;

2) 在含直流成分和多次谐波时,SRF-PLL和SOGI-PLL无法准确锁相,在基波频率附近发生周期振荡,IFFSOGI-PLL能够准确锁相,为 i_p-i_q 法提供更准确的电网角频率;

3) 在含直流成分和多次谐波时,传统 i_p-i_q 谐波检测法能够滤除部分高次谐波,但受直流成分影响较大,基于IFFSOGI的改进型 i_p-i_q 谐波检测法能够滤除直流成分和多次谐波,波形畸变率更小,检测效果更好。

4 结论

针对电网存在频率突变、直流成分和多次谐波时,传统 i_p-i_q 谐波检测算法无法准确检测电网中谐波问题,提出一种基于改进固定频率二阶广义积分器的 i_p-i_q 谐波检测算法,经理论分析和仿真验证,得到以下结论:

1) IFFSOGI能够克服传统SOGI输出正交信号不等幅问题,能够滤除信号中直流成分和多次谐波;

2) IFFSOGI-PLL能够在电网存在频率突变、直流成分和多次谐波时准确锁相,为 i_p-i_q 谐波检测算法提供更准确的电网频率;

3) 基于IFFSOGI的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法能够在电网存在直流成分和多次谐波时输出电流畸变率小,谐波检测效果较好。

参考文献

- [1] 罗隆福,陈洁,崔贵平,等.孤网系统滤波器谐波放大机理及抑制方法[J].电气传动,2019,49(4):54-60.
Luo Longfu, Chen Jie, Cui Guiping, et al. Harmonic magnification mechanism and suppression method of filter in isolated network system[J]. Electric Drive, 2019, 49(4): 54-60.
- [2] 喻敏,王斌,王文波,等.基于SST的间谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2016,36(11):2944-2951.
Yu Min, Wang Bin, Wang Wenbo, et al. An inter-harmonic detection method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2944-2951.
- [3] 陈至豪,王立德,王冲,等.基于组合余弦优化窗四谱线插值FFT的电力谐波分析方法[J].电网技术,2020,44(3):

- 1105-1113.
- Chen Zhihao, Wang Lide, Wang Chong, *et al.* An approach for electrical harmonic analysis based on optimized composite cosine window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1105-1113.
- [4] 耿中行, 张伏生. 电力系统谐波分析的全分量校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3481-3487, 7.
- Geng Zhongxing, Zhang Fusheng. The calibrating method of total harmonic components of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3481-3487, 7.
- [5] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
- Wu Jianzhang, Mei Fei, Chen Chang, *et al.* Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [6] 郝君, 张国山, 胡伟. 基于神经网络和对称秩的特定谐波消除开关角生成算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 162-171.
- Hao Jun, Zhang Guoshan, Hu Wei. Switching angle generation algorithm for selective harmonic elimination based on neural network and symmetric rank[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 162-171.
- [7] 童涛, 张新燕, 刘博文, 等. 基于傅里叶同步挤压变换和希尔伯特变换的谐波间谐波检测分析[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4200-4208.
- Tong Tao, Zhang Xinyan, Liu Bowen, *et al.* Analysis of harmonic and inter-harmonic detection based on Fourier-based synchrosqueezing transform and Hilbert transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4200-4208.
- [8] 崔浩, 舒朝君, 陈言. 基于瞬时无功功率理论的谐波检测和抑制的模型参考自适应控制系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(4): 6-10, 62.
- Cui Hao, Shu Chaojun, Chen Yan. Model reference self-adaptive control system of harmonic detection and suppression based on instantaneous reactive power theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(4): 6-10, 62.
- [9] 尹春杰, 王芳, 石磊, 等. 基于瞬时电压矢量定向的有源电力滤波器补偿电流检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 112-118.
- Yin Chunjie, Wang Fang, Shi Lei, *et al.* A novel compensation current detection method for APF based on transient voltage space vector orientation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 112-118.
- [10] 李金, 张喜铭, 时伯年, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J]. 电气传动, 2020, 50(3): 92-96, 106.
- Li Jin, Zhang Ximing, Shi Bonian, *et al.* An improved harmonic detection algorithm based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Drive, 2020, 50(3): 92-96, 106.
- [11] 王振尚, 傅鹏, 黄连生, 等. 基于 i_p-i_q 理论的改进谐波检测方法[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(5): 97-102.
- Wang Zhenshang, Fu Peng, Huang Liansheng, *et al.* Research on improved harmonic detection method based on i_p-i_q theory[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(5): 97-102.
- [12] 古超帆, 张新燕, 童涛, 等. 基于二阶广义积分器的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(10): 88-93.
- Gu Chaofan, Zhang Xinyan, Tong Tao, *et al.* An improved i_p-i_q harmonic detection algorithm based on second-order generalized integrator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(10): 88-93.
- [13] 童涛, 张新燕, 张家军, 等. 电网电压畸变下的频率自适应锁相技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 62-67.
- Tong Tao, Zhang Xinyan, Zhang Jiajun, *et al.* Frequency adaptive phase-locked technology for suppressing voltage distortion [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 62-67.
- [14] 戴毅, 常鲜戎, 董正华. 改进 I_p-I_q 法在D-STATCOM电流检测的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(7): 64-69.
- Dai Yi, Chang Xianrong, Dong Zhenghua. Application of improved I_p-I_q detection method on D-STATCOM current detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(7): 64-69.
- [15] 高正中, 田朔, 李雪杨, 等. 基于FBD法与 i_p-i_q 法的改进型谐波检测方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 128-133.
- Gao Zhengzhong, Tian Shuo, Li Xueyang, *et al.* Improved harmonic detection method based on FBD and i_p-i_q [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 128-133.

收稿日期:2020-06-21

修改稿日期:2020-08-07