

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106379

一种改进型 FBD 谐波及无功电流检测方法^{*}

张 展 杜诗扬 冷全超 刘亚晨

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454003)

摘 要: 基于 FBD 功率理论的谐波检测法因实现简单、稳定性强被广泛应用于有源电力滤波器,但传统 FBD 法在电网电压畸变下由于锁相环失锁,检测精度降低,且低通滤波器的使用存在稳态误差与响应速度不可兼得的固有矛盾。针对此不足提出一种改进型方法,该方法首先通过对三相电压偏移 60° 进而快速提取正序电压分量,以代替基准参考电压信号参与运算,避免了电压不对称引起的检测误差;并构建出一种基于双曲正切函数的变步长自适应滤波器获取基波等效有功电导,引入误差信号的自相关时间均值估计反馈变步长迭代函数,使自适应算法和 FBD 检测算法有机融合,有效提升了算法的动态响应速度。理论推导与仿真结果证实了该改进算法的正确性与有效性。

关键词: FBD 谐波检测;电压不对称;锁相环;自适应滤波器;变步长

中图分类号: TM935 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

An improved harmonic and reactive current detection method based on FBD features

Zhang Zhan Du Shiyang Leng Quanchao Liu Yachen

(College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The harmonic detection method based on FBD power theory was widely used in active power filters because of its simple implementation and strong stability. However, the detection accuracy of traditional FBD method is reduced due to the phase-locked loop unlocking under the voltage distortion of the power grid, and there is inherent contradiction between the steady-state error and the response speed when using the low-pass filter. To solve this problem, an improved method is proposed. In this method, the positive sequence voltage component is extracted quickly by shifting the three-phase voltage by 60° to replace the reference voltage signal to participate in the operation, so as to avoid the detection error caused by voltage asymmetry. An adaptive filter with variable step size based on hyperbolic tangent function was constructed to obtain the equivalent active conductance of fundamental wave. The adaptive algorithm and FBD detection algorithm were integrated organically, and the dynamic response speed of the algorithm was improved effectively. Theoretical derivation and simulation results confirm the correctness and effectiveness of the improved algorithm.

Keywords: FBD harmonic detection; voltage asymmetry; PLL; adaptive filter; variable step size

0 引 言

随着我国智能电网技术的飞速发展,大量光伏、风电等分布式电源不断接入,非线性设备、冲击性负荷应用日益广泛。使得电力系统中的谐波污染问题越来越严重且功率因数降低^[1]。这些问题的存在会使用电设备的损耗增加,降低精密测量仪器的计量精度,导致继电保护设备误动作,使移动通信信号受到干扰,给电网带来一系列不利影响^[2]。有源电力滤波器(APF)作为一种动态抑制谐波和补偿无功的新型电力电子装

置,其关键技术在于对谐波和无功电流的精准、快速检测^[3-4]。

目前,常用的谐波检测方法主要有:基于傅里叶变换的谐波检测法^[5],该方法要求满足同步采样,否则易出现栅栏效应和频谱泄露;基于小波理论的谐波检测法^[6],该方法在选取不同的小波基函数可能造成检测结果的差异性很大;基于神经网络的谐波检测法^[7],该方法需大量样本来训练算法的权值,且易出现局部最优解;基于希尔伯特-黄变换的谐波检测法^[8],该方法在对高次谐波的检测中易出现虚假分量,模态混叠等问题。上述这些算法的缺点也进一步限制了其工程应用。

收稿日期:2021-04-14

^{*} 基金项目:矿山电力电子装置与控制科研团队基金(CXTD2017085)项目资助

基于 FBD 功率理论的谐波检测法是通过计算等效电导来分离电流,无需复杂的矩阵变换,具有实现简单,鲁棒性强等优点,近年来被广泛应用于供电系统中,但该方法在电压畸变或不平衡下检测谐波及无功电流时存在误差,文献[9]指出误差引起的原因,并对两路线电压进行处理,得到与基波正序电压同频同相的参考电压信号,进而求取待补偿电流,但该算法多次用到矩阵变换且使用低通滤波器(LPF),依然存在动态响应较慢,实时性不够好等缺点。本文基于此,研究一种改进型方法,该方法首先通过对三相电压延时 1/6 工频周期进而快速提取正序电压,以代替锁相环(PLL)得到的参考电压信号,使基波正序有功电流检测更加精确。同时,构建一种基于双曲正切函数的变步长自适应滤波器来代替传统低通滤波器,以提高 FBD 检测算法的动态响应速度。

1 传统的 FBD 谐波检测法

1.1 FBD 谐波检测法理论分析

FBD 谐波检测法最早由德国学者 Fryze 提出,后 Buchholz 和 Dpenbrock 等在此基础上做进一步完善。其基本思想是将电路中的每一相负载都等效为理想电导串联在该相电路中,认为等效电导消耗电路中所有功率,通过等效电导来分解电流进而得到所要补偿的谐波电流及无功电流^[10-11]。传统 FBD 谐波检测法原理如图 1 所示。

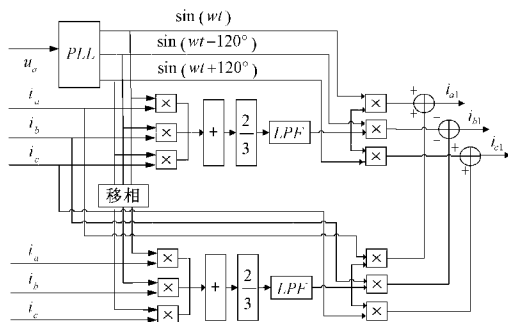


图 1 FBD 谐波检测法原理

为避免三相电压不对称的影响,常采用 A 相电网电压经过锁相环得到三相基准参考电压,使三相电压幅值不参与运算,以提高检测精度。在三相四线制电力系统中,设三相基准参考电压和负载电流如下所示:

$$\begin{cases} u_a = \sin(\omega t) \\ u_b = \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_a = \begin{bmatrix} I_{n+} \sin(n\omega t + \varphi_{n+}) + \\ I_{n-} \sin(n\omega t + \varphi_{n-}) + I_{n0} \sin(n\omega t + \varphi_{n0}) \end{bmatrix} \\ i_b = \begin{bmatrix} I_{n+} \sin(n\omega t + \varphi_{n+} - 2\pi/3) + \\ I_{n-} \sin(n\omega t + \varphi_{n-} + 2\pi/3) + I_{n0} \sin(n\omega t + \varphi_{n0}) \end{bmatrix} \\ i_c = \begin{bmatrix} I_{n+} \sin(n\omega t + \varphi_{n+} + 2\pi/3) + \\ I_{n-} \sin(n\omega t + \varphi_{n-} - 2\pi/3) + I_{n0} \sin(n\omega t + \varphi_{n0}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中:各相负载电流都可分解为正、负、零序分量的叠加, I_{n+} 、 I_{n-} 、 I_{n0} 分别表示负载电流正、负、零序分量的幅值, φ_{n+} 、 φ_{n-} 、 φ_{n0} 分别表示为各序分量的初相位。

瞬时等效有功电导表达式如下:

$$G_p(t) = \frac{P_\Sigma}{\|u\|^2} = \frac{\langle u, i \rangle}{\langle u, u \rangle} = \frac{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c}{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \{ I_{n+} \cos[(n-1)\omega t + \varphi_{n+}] - I_{n-} \cos[(n+1)\omega t + \varphi_{n-}] \} \quad (3)$$

计算等效无功电导需先对三相基准参考电压相移 90° , 如下所示:

$$\begin{cases} u_a^* = \cos(\omega t) \\ u_b^* = \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c^* = \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

瞬时等效无功电导表达式如下:

$$G_q(t) = \frac{P_\Sigma}{\|u^*\|^2} = \frac{\langle u^*, i \rangle}{\langle u^*, u^* \rangle} = \frac{u_a^* i_a + u_b^* i_b + u_c^* i_c}{u_a^{*2} + u_b^{*2} + u_c^{*2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \{ I_{n+} \sin[(n-1)\omega t + \varphi_{n+}] - I_{n-} \sin[(n+1)\omega t + \varphi_{n-}] \} \quad (5)$$

等效有功电导与等效无功电导中含有直流分量与交流分量,直流分量对应基波等效电导,可经低通滤波器获得:

$$\overline{G_p(t)} = I_{1+} \cos\varphi_{1+} \quad (6)$$

$$\overline{G_q(t)} = I_{1+} \sin\varphi_{1+} \quad (7)$$

将基波等效有功电导与基波等效无功电导乘以相应的基准参考电压,得到基波正序有功电流与无功电流,再将两者相加得到三相基波正序电流。则待补偿的谐波电流为各相负载电流减去相对应基波正序电流。

$$\begin{cases} i_{a1} = \overline{G_p(t)} \cdot u_a + \overline{G_q(t)} \cdot u_a^* = I_{1+} \sin(\omega t + \varphi_{1+}) \\ i_{b1} = \overline{G_p(t)} \cdot u_b + \overline{G_q(t)} \cdot u_b^* = I_{1+} \sin(\omega t + \varphi_{1+} - 2\pi/3) \\ i_{c1} = \overline{G_p(t)} \cdot u_c + \overline{G_q(t)} \cdot u_c^* = I_{1+} \sin(\omega t + \varphi_{1+} + 2\pi/3) \end{cases} \quad (8)$$

1.2 FBD 谐波检测法局限性分析

FBD 谐波检测算法不受零序电流的影响,可广泛应用于单相、三相系统,物理意义明确,实现简单。相比于工程上应用较多的基于瞬时无功功率理论的谐波检测法而言,FBD 法无需 park 变换和 clark 变换,更容易编程化,但传统 FBD 检测法中由于使用锁相环和低通滤波器电路,在检测基波正序有功电流时存在延时效应及稳态误差^[12]。当三相电网电压不对称或发生畸变,锁相环检测到的并非 A 相正序电压相位,而是正、负、零序相位的叠加,故所测信号与理论值之间存在一个相位差 $\Delta\phi$, 此时,三相参考电压信号实际为:

$$\begin{cases} u_a = \sin(\omega t + \Delta\phi) \\ u_b = \sin(\omega t + \Delta\phi - 2\pi/3) \\ u_c = \sin(\omega t + \Delta\phi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (9)$$

瞬时等效有功电导为:

$$G_p(t)^* = \frac{P_\Sigma}{\|u\|^2} = \frac{\langle u, i \rangle}{\langle u, u \rangle} = \frac{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c}{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2} = \sum_{n=-1}^{\infty} \{ I_{n+} \cos[(n-1)\omega t + \varphi_{n+} - \Delta\phi] - I_{n-} \cos[(n+1)\omega t + \varphi_{n-} + \Delta\phi] \} \quad (10)$$

经低通滤波器得其直流分量:

$$\overline{G_p(t)}^* = I_{11} \cos(\varphi_1 - \Delta\phi) \quad (11)$$

进而求得三相基波正序有功电流为:

$$\begin{cases} i_{a1p} = \overline{G_p(t)}^* \cdot u_a = I_{1-} \cos(\varphi_{1+} - \Delta\phi) \sin(\omega t + \Delta\phi) \\ i_{b1p} = \overline{G_p(t)}^* \cdot u_b = I_{11} \cos(\varphi_{11} - \Delta\phi) \sin(\omega t + \Delta\phi - 2\pi/3) \\ i_{c1p} = \overline{G_p(t)}^* \cdot u_c = I_{1-} \cos(\varphi_{1+} - \Delta\phi) \sin(\omega t + \Delta\phi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可看出,当三相电压不对称时,由于锁相环的影响,导致 FBD 法在检测基波正序有功电流中存在一定的相位和幅值误差,影响检测准确性。

2 改进的 FBD 谐波检测算法

2.1 改进的锁相环电路

由以上分析可知,传统 FBD 检测法在电压不平衡下检测基波正序有功电流存在一定局限性,本节对锁相环电路进行改进,通过快速提取三相正序电压,代替锁相环电路参与运算,消除稳态误差。

当三相电网电压不对称时,任意相正序电压可由对称分量法解耦得到,如下所示:

$$\begin{bmatrix} u_a^+ \\ u_b^+ \\ u_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \alpha = e^{j2\pi/3} \quad (13)$$

由式(13)可得 A 相正序电压为:

$$u_a^+ = \frac{1}{3}(u_a + \alpha u_b + \alpha^2 u_c) \quad (14)$$

由上式可知,对于传统对称分量法,在提取正序电压过程中需对某一相电压最大移相 240° ,将会导致在合成正序电压的过程中存在较大延时,进而影响谐波检测速度。因此,对移相子 α 和 α^2 进行数学变换:

$$\begin{cases} \alpha^2 = e^{j2\pi/3} = -1/2 - j\sqrt{3}/2 = e^{j\pi/3} - 1 \\ \alpha = e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 = -e^{-j\pi/3} \end{cases} \quad (15)$$

经过式(15)对移相子进行数学变换后,获取正序电压时只需对三相电压进行 60° 偏移处理,即延迟 $1/6$ 工频周期。联立式(13)~(15)可得到三相正序电压表达式如下:

$$\begin{cases} u_a^- = \frac{1}{3}(u_a + \alpha u_b + \alpha^2 u_c) = \frac{1}{3}(u_a - e^{-j\pi/3} u_b + e^{-j\pi/3} u_c - u_c) \\ u_b^- = \frac{1}{3}(\alpha^2 u_a + u_b + \alpha u_c) = \frac{1}{3}(e^{j\pi/3} u_a - u_a + u_b - e^{-j\pi/3} u_c) \\ u_c^- = \frac{1}{3}(\alpha u_a + \alpha^2 u_b + u_c) = \frac{1}{3}(u_c - e^{-j\pi/3} u_a + e^{j\pi/3} u_b - u_b) \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)得到的正序电压信号来代替传统锁相环得到的正弦信号,计算简单,且能够避免三相电压不平衡下锁相环引起的误差。

2.2 改进的低通滤波器电路

传统 FBD 谐波检测法在获取基波等效有功电导中采用低通滤波器,低通滤波器的性能易受截止频率和滤波器阶数影响,截至频率选择过大,算法动态响应速度快,但检测精度降低;如果截至频率选择过小,将会导致相反的效果。故在选取的过程中往往根据工程经验折衷检测精度与响应速度^[13]。基于自适应对消原理的最小均方算法(least mean square)作为一个闭环系统,对系统参数的变化有着自适应能力,实现简单,稳定性强,可精确跟踪系统变化,其基本原理是沿目标函数梯度的反方向不断反复迭代更新滤波器的权向量,使其在误差曲面上快速达到最优^[14]。将自适应算法应用于谐波检测上,算法中的步长因子影响收敛速度与稳态精度。为克服这个问题,一些专家学者提出变步长 LMS 算法,变步长算法的思想是在初始阶段或者信号突变的时候有一个大的步长以加快算法动态响应速度,在趋于收敛时有一个小的步长以减小稳态误差。变步长自适应算法在谐波检测中常用于单向系统,在三相电路中构建复杂。关于自适应谐波检测算法的详细原理可参考文献[15-16],由于篇幅有限,本文不过多阐述。

众多变步长算法中,双曲正切函数最为典型,可加快算法在初始状态或信号突变下的跟踪速度。为此,笔者提出一种基于双曲正切函数的变步长 LMS 算法来代替 FBD 检测算法中的低通滤波模块^[17-18],以更好地跟踪直流分量。一方面提高 FBD 检测算法的快速性和准确性,另一方面使自适应算法嵌套在 FBD 算法中,扩展了自适应算法的应用范围。本文提出的变步长自适应算法如下:

$$e(n) = i_L(n) - w^T(n)x(n) \quad (17)$$

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu(n)e(n)x(n) \quad (18)$$

$$\beta(n) = \delta\beta(n-1) + \gamma p^2(n) \quad (19)$$

$$\mu(n+1) = \beta(n) \left(1 - \frac{h+1}{h + \exp(a | p(n) |^2)} \right) \quad (20)$$

$$p(n) = mp(n-1) + (1-m)e(n)e(n-1) \quad (21)$$

式中: $e(n)$ 为反馈误差; $\mu(n+1)$ 为算法步长; $\beta(n)$ 控制步长范围; $\beta(n)$ 的引入使系统参数发生变化时也能将步长限制在一个合适的范围内; $p(n)$ 为自相关时间均值估计; $p(n)$ 的引入可消除零均值及减小不相关噪声的影响; 参数 h 和 a 共同调节双曲正切函数的底部平滑程度。将自适应算法应用于 FBD 检测法中求取等效有功电导,需根据 FBD 检测环境的输入输出对自适应算法做出相关调整。自适应算法中输入由 $e(n)$ 变为 $e(n)u^+(n)/\|u^+(n)\|^2$, 则式(17)~(21)可变化为:

$$e(n) = i_L(n) - w^T(n)u^-(n) \quad (22)$$

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu(n)e(n)u^1(n)/\|u^1(n)\|^2 \quad (23)$$

$$\mu(n+1) = \beta(n) \left(1 - \frac{h+1}{h + \exp(a | p(n) |^2)} \right) \quad (24)$$

$$\beta(n) = \delta\beta(n-1) + \gamma p^2(n) \quad (25)$$

$$p(n) = mp(n-1) + (1-m)e(n)u^+(n) \cdot e(n-1)u^-(n-1) / \|u^+(n)\|^2 \|u^-(n-1)\|^2 \quad (26)$$

经过自适应算法后,初始阶段 $e(n)$ 中含有大量基波有功电流成分,与三相正序电压的相关性较大,导致自适应算法会以一个大的步长加快 $w(n)$ 收敛,在达到稳态后, $e(n)$ 中主要是谐波及无功电流,与正序电压的关联性减弱,步长会降低至最小,以保证 $w(n)$ 在很小范围内波动。此时,直流分量 $w(n)$ 在数值上无限接近于等效有功电导 $G_P(t)$ 。在谐波检测的整个过程中,自适应算法属于动态调节,同时,FBD 谐波检测的环境由原来的开环检测变为闭环检测,一定程度上加强了算法的抗干扰性能。综上,改进后 FBD 谐波及无功电流检测原理如图 2 所示,图中, i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 分别表示待测三相谐波及无功电流。自适应算法原理如图 3 所示。

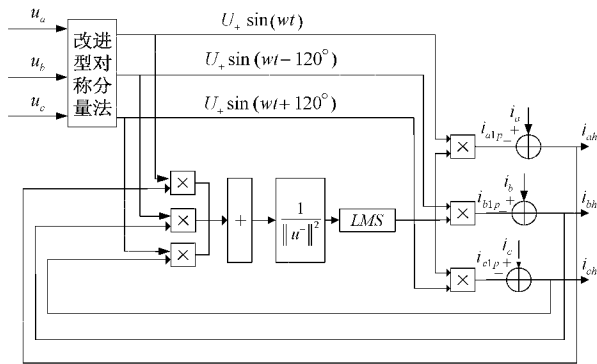


图 2 改进型 FBD 法检测原理

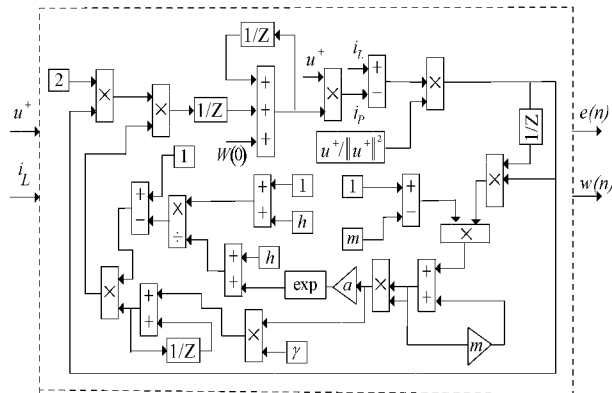
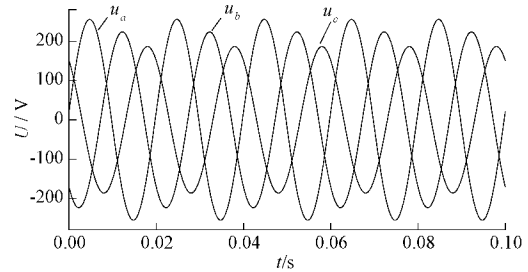


图 3 自适应算法原理

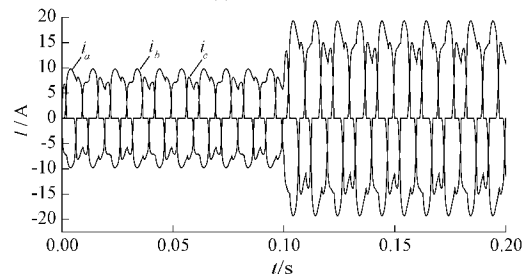
3 仿真实验分析

本文采用 MATLAB/Simulink 仿真软件来验证改进型算法的有效性与其可行性。在三相三线制电压不平衡环境下,对改进算法进行建模分析,并传统 FBD 检测法进行对比。谐波源选取电力系统中常见的三相不可控整流带阻

感性负载电路,电压源设置幅值为 220 V,A 相初相角为 0°的正序电压上叠加一个幅值为 40 V,A 相初相角为 30°的负序电压。负载电阻 $R=45 \Omega$,负载电感 $L=5 \text{ mH}$,总仿真时间为 0.2 s。为验证本文算法的抗干扰性,在 0.1 s 时,对负载并入 45Ω 的电阻使负载电流发生突变。本仿真中,自适应算法参数设置为: $\delta=0.96, \gamma=1.77, \alpha=1 \times 10^3, h=60, m=0.975$ 。图 4 为三相不平衡电压与待测负载电流波形,可以看出,在不平衡电压和不可控负载的双重作用下,负载电流产生严重畸变。



(a) 三相电压波形



(b) 负载电流波形

图 4 三相电压与负载电流波形

图 5 为改进型对称分量法获取基波正序电压波形图,可以看出,在经过 $1/6 T$ 频周期的延时能精确提取正序电压分量。图 6 为传统算法和改进算法在检测三相基波正序有功电流对比图,从图中可知,改进型算法有着更快的检测速度与更好的三相平衡度,即使在负载突变的情况下也能更快跟踪上待测电流。

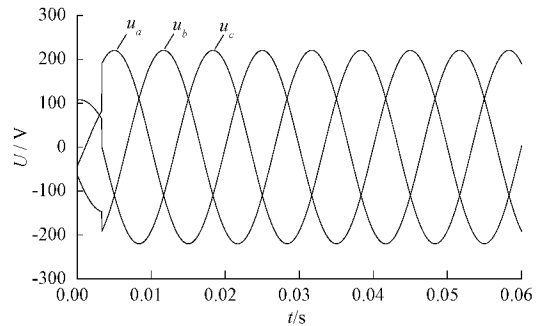


图 5 正序电压提取波形

图 7 为两种算法在获取基波等效有功电导的波形对比图,曲线 1 为滤波器的输入波形,曲线 2 为经滤波器获取的直流分量,在初始阶段或信号突变的时候,系统中误差较大,

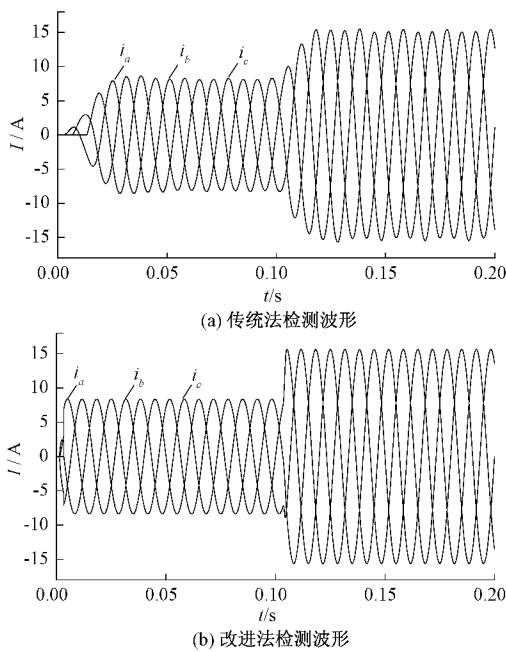


图 6 传统法与改进法检测波形对比

自适应算法中变步长因子调整较快,算法很快收敛,待系统稳定后变步长因子调整趋缓,获得更加精确的直流分量。从对比图中可以看出,自适应滤波器在初始阶段和系统突变的过程中跟踪基波等效有功电导都优于传统低通滤波器。

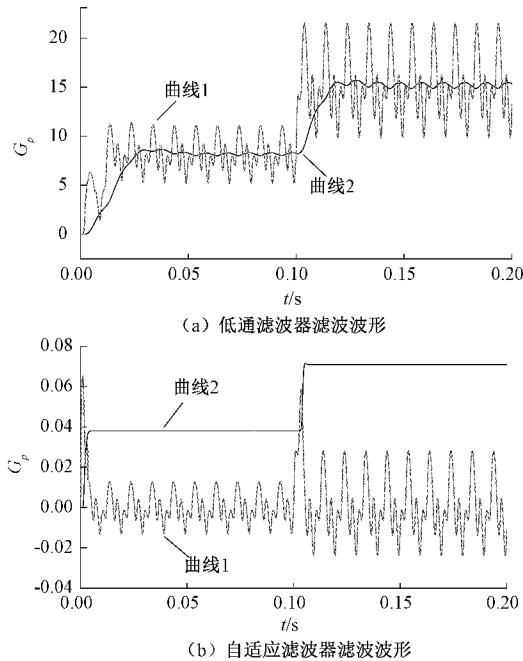


图 7 等效有功电导滤波对比图

本文算法旨在检测基波正序有功电流,图 8 为 A 相正序电压与 A 相检测电流波形对比图,可看出,两波形处于同一相位,说明改进型算法在三相不平衡电压下能够精确跟踪有功电流。

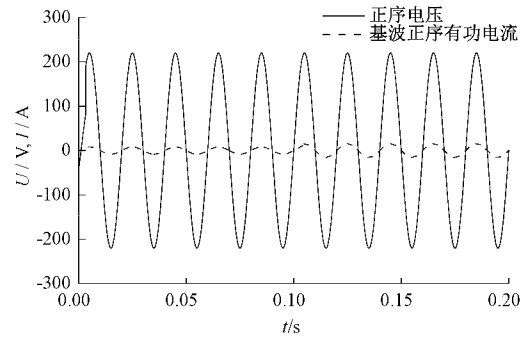


图 8 正序电压与基波有功电流对比图

图 9 为传统法与改进法检测 A 相基波正序有功电流波形对比,可看出,相比改进法,传统检测法有一定的相位和幅值误差,影响 APF 补偿性能。由以上仿真波形图可知,改进型 FBD 算法有着更好的检测效果。

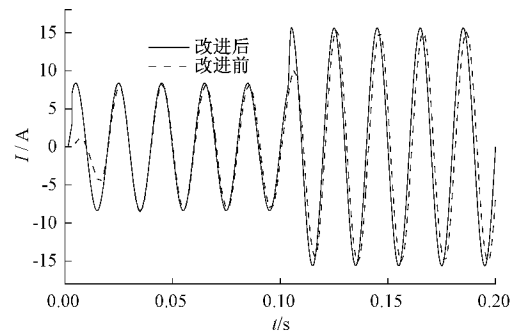


图 9 A 相检测电流波形对比图

4 结 论

本文分析了传统 FBD 谐波检测算法在电网电压不对称下的局限性,提出一种优化方法,结论如下。

1)把无锁相技术应用到 FBD 谐波检测算法中,通过对对称分量法的移相子进行数学变换,进而快速提取正序电压分量参与运算,摆脱了锁相环电路在电压不平衡下引起的检测误差。

2)构建一种基于双曲正切函数的变步长自适应滤波器来获取等效电导中的直流分量,引入自相关时间均值估计反馈步长迭代函数,使 FBD 检测算法与自适应算法有机融合,提升了算法的实时性能。

3)改进型算法在电压畸变和电路参数发生突变下能够快速、准确的检测出谐波及无功电流,为有源滤波技术的应用实践提供一定参考价值。

参考文献

[1] 熊杰锋,李群,袁晓冬,等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 125-133.
 [2] 黄星宇,罗萍萍,龚锦霞,等. 新能源并网系统次同步谐波相量检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(13): 38-44.
- [3] 刘少军, 王瑜瑜. 基于 DSP 的有源滤波控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 97-101.
- [4] 蔡星月, 高云鹏, 李云峰, 等. 基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱谐波检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 199-207.
- [5] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 一种优化窗函数及其在电网谐波检测中的应用分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 239-246, 252.
- [6] 曹志威. 基于小波变换的谐波分析方法研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- [7] 单亚峰, 张胜强, 刘汀, 等. 基于 ACC 优化 Elman 神经网络的谐波检测方案[J]. 控制工程, 2016, 23(11): 1646-1650.
- [8] 周金, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于改进小波阈值函数和 CEEMD 电能质量扰动检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 141-148.
- [9] 史丽萍, 刘鹏, 徐天然, 等. 一种改进无锁相环 FBD 谐波和无功电流检测方法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(16): 56-61.
- [10] WANG D, ZHANG L, WANG C, et al. A harmonic detection strategy based on FBD power theory [C]. PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE, 2019: 1-5.
- [11] 张志文, 李晓海, 张洪浩, 等. 基于 FBD 法的基波正负序电流实时检测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 96-100, 105.
- [12] 王清亮, 赵东强, 付周兴, 等. 一种改进的无锁相环 FBD 谐波电流检测方法[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(11): 19-24.
- [13] 张建忠, 耿治, 徐帅, 等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4323-4333.
- [14] 袁晓曦, 彭升. 基于最小均方和递归最小二乘的有源滤波器谐波检测[J]. 电子器件, 2017, 40(2): 386-389.
- [15] 王洪诚, 王蕾, 沈霞, 等. 基于改进增益型自适应 LMS 算法的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 42-46.
- [16] MAURYA A K. Cascade-cascade least mean square(LMS) adaptive noise cancellation[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2018, 37(9): 3785-3826.
- [17] 施焯, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于自适应原理的改进型 FBD 谐波电流检测算法[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1051-1058.
- [18] 章坚武, 余皓, 章谦骅. 改进的双曲正切函数的变步长 LMS 算法[J]. 通信学报, 2020, 41(11): 116-123.

作者简介

张展, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、谐波治理与无功补偿。

E-mail: zhangzhan@hpu.edu.cn

杜诗扬(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏微电网电能质量检测与提高。

E-mail: 1137672938@qq.com