

文章编号:1671-251X(2013)08-0056-05

DOI:

刘阳,王晓莹.基于广义积分器的谐波电流检测方法研究[J].工矿自动化,2013,39(8):56-60.

基于广义积分器的谐波电流检测方法研究

刘阳¹, 王晓莹²

(1.中煤科工集团常州自动化研究院,江苏 常州 213015;

2.中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要:针对四桥臂有源电力滤波器的谐波检测环节,提出了一种基于广义积分器的谐波电流检测方法,分析了该检测方法的检测原理及参数 k 的变化对谐波电流检测效果的影响。仿真结果表明,当电网频率稳定时,该检测方法可准确地提取谐波电流中的基波分量;参数 k 影响检测的快速性和精确性,应合理设置;该检测方法结构简单,易于实现,对于电网电压畸变、电网频率波动及三相负载不平衡的情况有一定的适应性。

关键词:有源电力滤波器;谐波检测;广义积分器;频率偏差;基波分量

中图分类号:TD608

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Research of harmonic current detection method based on generalized integrator

LIU Yang¹, WANG Xiao-ying²

(1.Changzhou Automation Research Institute of CCTEG, Changzhou 213015, China;

2.School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of harmonic detection link of four-leg active power filter, the paper proposed a harmonic current detection method based on generalized integrator, and analyzed detection principle of the detection method and influence on detection effect of harmonic current by change of parameter k . The simulation result shows that the detection method can extract fundamental component of harmonic current when frequency of power network is stable; the parameter k influences on rapidity and accuracy of detection, so it should be set reasonably; the detection method has certain adaptability to distortion of power voltage, fluctuation of power frequency and unbalance of three-phase load with simple structure and being easy to realize.

Key words: active power filter; harmonic detection; generalized integrator; frequency deviation; fundamental component

0 引言

大量电力电子装置的投入使用,使低压供电系统的谐波问题日益突出^[1]。同时,由于负荷分配不均,三相四线制供电系统的三相不平衡问题较严重^[2]。并联型四桥臂有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是解决谐波和三相不平衡问题

的有效措施之一^[3-4],而 APF 取得较好补偿效果的前提是准确、快速地检测出谐波电流。本文采用基于广义积分器的谐波电流检测方法进行谐波电流检测,并通过理论分析和仿真验证其有效性。

1 四桥臂 APF 基本原理

图 1 为用于补偿三相四线制供电系统谐波的四

收稿日期:2013-05-10。

基金项目:科技部科研院所专项(2012EG122196)。

作者简介:刘阳(1985—),男,江苏常州人,助理工程师,主要从事煤矿监控设备检测工作,E-mail:290144308@qq.com。

桥臂 APF 拓扑结构,其中 e_a, e_b, e_c 分别为三相电源电压, u_a, u_b, u_c, u_n 分别为四桥臂变流器的交流输出电压, i_a, i_b, i_c, i_n 分别为 APF 输出的三相及中线补偿电流, U_{dc} 为直流侧电压, i_d 为直流侧电流, C 为直流侧电容, L 为 APF 交流侧进线电感, R 为进线电感等效电阻。

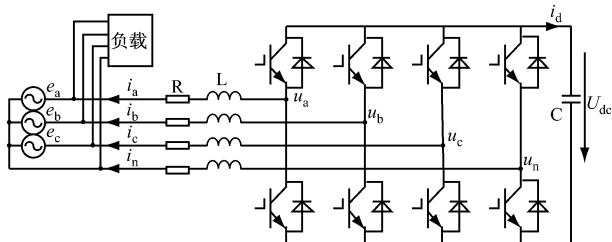


图1 四桥臂 APF 拓扑结构

由于中线补偿电流的存在,三相补偿电流 i_a, i_b, i_c 之和并不为零。根据基尔霍夫电流定理,可以平衡控制三相及中线补偿电流 i_a, i_b, i_c, i_n ^[5]。三相四线制 APF 的控制包括畸变电流的检测、畸变电流的跟踪控制、直流侧电容电压的恒定控制和平衡控制 3 个部分。

APF 滤除谐波原理^[6-8]如图 2 所示,其中 e_s 为电源电压, i_s 为电源电流, i_L 为负载电流, i_c 为 APF 补偿电流, i_c^* 为补偿电流指令信号, C 为直流侧电容。

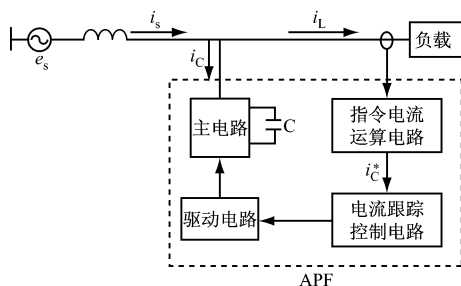


图2 APF 滤除谐波原理

2 广义积分器基本原理

常用的积分器形式为 $G(s) = \frac{1}{s}$,是针对直流信号进行幅值积分。广义积分器与常规的积分器不同,是一种针对非直流信号的积分器,它的传递函数为 $G(s) = \frac{2s}{s^2 + \omega^2}$ (ω 为广义积分器的谐振频率),采用这种控制方式的 APF 可实现零稳态误差。下面简要介绍广义积分器的基本原理。

在信号分析中,任意周期信号都可以通过傅里叶算法分解成不同频率的正弦量的叠加。针对周期信号,希望广义积分器能够对该周期信号的幅值进

行积分,而对其频率和相角不起作用^[9]。因此,信号 $e(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$ 的广义积分为 $y(t) = A\sin(\omega t + \varphi)t$ 。

对于正弦信号 $e(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$,构造辅助信号 $x(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$,它由 $e(t)$ 延时 90° 得到,期望输出为正弦信号 $e(t)$ 的幅值积分函数 $y(t) = A\sin(\omega t + \varphi)t$ 。对 $x(t), e(t)$ 和 $y(t)$ 进行拉普拉斯变换,则

$$X(s) = \frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} - \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

$$E(s) = \frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} + \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \quad (2)$$

$$Y(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \left(\frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} + \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \left(\frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} - \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (3)$$

式中: $X(s), E(s), Y(s)$ 分别为 $x(t), e(t)$ 和 $y(t)$ 的拉氏变换式。

由式(1)一式(3)可得到

$$Y(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X(s) \quad (4)$$

电网频率正常波动情况下,当 $e(t)$ 信号有频率偏差 $\Delta\omega$ 时,即

$$e'(t) = A\sin[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi] \quad (5)$$

则辅助信号和期望的积分信号分别为

$$x'(t) = A\cos[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi] \quad (6)$$

$$y'(t) = A\sin[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi]t \quad (7)$$

这时

$$Y'(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E'(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X'(s) = L \left\{ A t \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \varphi \right] \frac{\sin(\Delta\omega/2)}{\Delta\omega/2} \right\} \quad (8)$$

式中: $L\{*\}$ 表示信号 $*$ 的拉普拉斯变换。

当频率偏差 $\Delta\omega$ 较小时,可认为其满足 $\sin \frac{\Delta\omega}{2} \approx$

$\frac{\Delta\omega}{2}$,由此可得

$$Y'(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E'(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X'(s) \approx L \left\{ A t \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \varphi \right] \right\} \quad (9)$$

当 $\Delta\omega$ 远远大于 1 时,有

$$\frac{\sin(\Delta\omega/2)}{\Delta\omega/2} \approx 0 \quad (10)$$

根据式(8)可得到

$$Y'(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E'(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X'(s) \approx 0 \quad (11)$$

可见,式(8)只对频率为 ω 或者频率偏移较小的信号成立,而当输入信号中包含杂质信号,且杂质信号的频率与输入信号 $e(t)$ 频率 ω 偏差很大时,广义积分器只对频率为 ω 的信号进行积分,对杂质信号输出为零。

3 基于广义积分器的谐波电流检测方法原理

将广义积分器用于谐波电流检测的原理如图 3 所示(k 为闭环系统的前向通道增益,相当于比例调节器)。首先将三相电流经 3/2 变换表示为 α - β 坐标系下的电流 i_α, i_β ,当输入信号为正序三相电流,且基波频率为 ω 时, i_α 比 i_β 超前 90° ,因此,将 $-i_\beta$ 作为 i_α 的辅助信号, i_α 作为 i_β 的辅助信号。由于谐波频率与基波频率偏差很大,当谐波信号存在于三相电流中时,谐振频率为 ω 的广义积分器对于谐波分量的积分为零;考虑电网频率正常波动的情况,电力系统频率允许偏差为 $\pm 0.2 \sim 0.5 \text{ Hz}^{[10]}$,由于频率偏差 $\Delta\omega$ 较小,可认为该偏差满足 $\sin \frac{\Delta\omega}{2} \approx \frac{\Delta\omega}{2}$,由式(8)可知,此时广义积分器实现对电流信号幅值的积分。综上所述,当频率在正常范围内波动时,可以利用基于广义积分器的谐波电流检测方法检测出电流中的基波分量。

基于瞬时无功率理论的谐波电流检测方法及 FBD(Fryze Buchholz Dpenbrock)谐波电流检测方法通常要用到锁相环(PLL)和低通滤波器,且在检测过程中需要提取电压信号。由图 3 可知,采用基于广义积分器的谐波电流检测方法,省去了 PLL 和低通滤波器环节,且在提取所需的基波成分时,不需要电压信号,无需考虑电压畸变的影响。因此,该

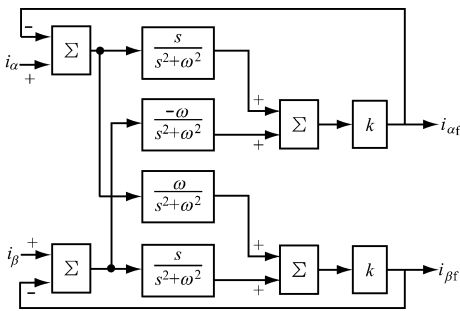


图 3 基于广义积分器的谐波电流检测原理

方法算法简单,易于实现。但图 3 中的 k 值变化将影响谐波检测环节的快速性与准确性。

4 仿真分析

根据图 3,在 Matlab 中搭建了三相四线制供电系统仿真模型,以验证基于广义积分器的谐波电流检测方法的可行性。为模拟电流畸变且三相平衡的情况,谐波源负载包括三相不控整流桥及 A 相电阻负载,其电路如图 4 所示。

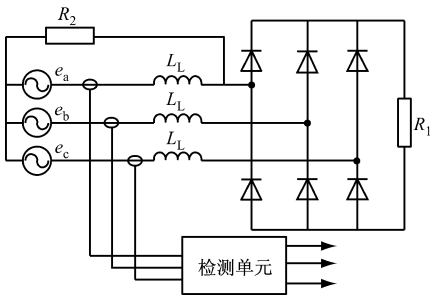


图 4 谐波源电路

0.5 s 时,向电源电压注入 3 次及 5 次谐波,观察电压畸变对检测效果的影响。电源及谐波源仿真参数设置见表 1。

表 1 电源及谐波源仿真参数设置

0.5 s 前电源电压/V	0.5 s 后电源电压/V	电阻/ Ω	电感/mH
$e_a = 220\sin \omega t$	$e_a = 220\sin \omega t + 22\sin 3\omega t + 11\sin 5\omega t$	$R_2 = R_1 = 60$	$L_L = 0.1$
$e_b = 220\sin(\omega t - 2\pi/3)$	$e_b = 220\sin(\omega t - 2\pi/3) + 22\sin 3\omega t + 11\sin(5\omega t + 2\pi/3)$		
$e_c = 220\sin(\omega t + 2\pi/3)$	$e_c = 220\sin(\omega t + 2\pi/3) + 22\sin 3\omega t + 11\sin(5\omega t - 2\pi/3)$		

图 5 为电网频率稳定且未发生畸变时, k 取不同值时的基波电流频谱,从中可看出, $k = 10$ 时,基波电流幅值为 11.2 A,谐波畸变率 D_{TH} 为 0.12%; $k = 100$ 时,基波电流幅值为 11.25 A,谐波畸变率 D_{TH} 为 1.16%。结果表明,采用基于广义积分器的谐波电流检测方法检测到的基波电流畸变率很小,能够比较准确地提取基波电流, k 值的变化也不会

使检测到的基波电流幅值有明显变化。从图 3 可看出, k 值会影响整个环路的响应时间, k 值越大响应时间越快,为了提高谐波检测的快速性,需要在一定程度上增大 k 值。但从图 5 可看出, k 值的增大使谐波畸变率有所增大,降低了谐波检测精度。

为了验证 k 值对快速性的影响,假设负载电流如式(12)所示,此时负载电流无畸变但三相不平衡。

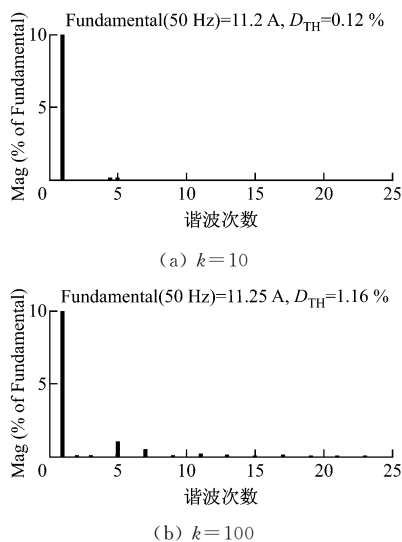


图5 电网频率稳定且未发生畸变时, k 取不同值时的基波电流频谱

$$\begin{cases} i_{La} = 14\sin \omega t \\ i_{Lb} = 12\sin(\omega t - 2\pi/3) + 2\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ i_{Lc} = 12\sin(\omega t + 2\pi/3) + 2\sin(\omega t - 2\pi/3) \end{cases} \quad (12)$$

三相负载电流和通过基于广义积分器的谐波电流检测方法提取的三相基波电流如图6所示,从中可看出, $k=10$ 时,基波电流需要约7个基波周期达到稳定; $k=100$ 时,只需约2个基波周期就可达到稳定,快速性明显提高。同时, $k=100$ 时,各相基波电流幅值有所差异,表明检测精度下降。

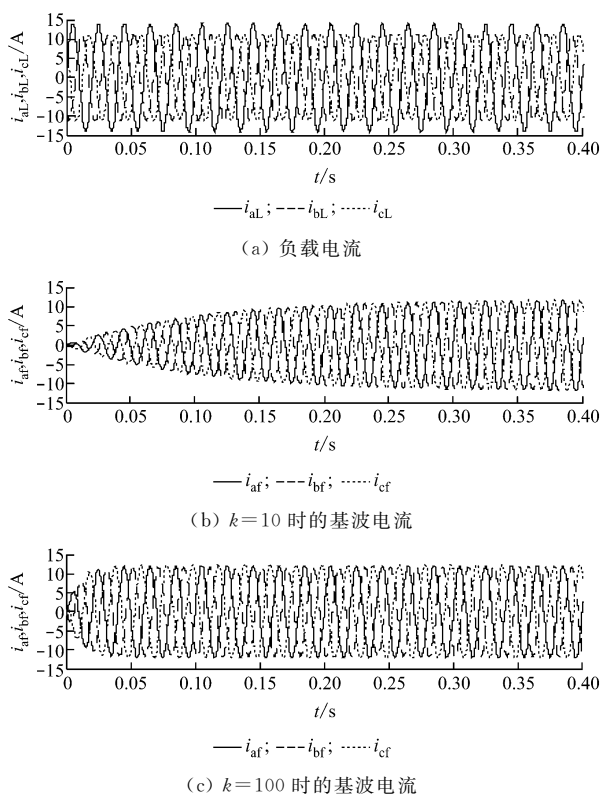


图6 三相负载电流和三相基波电流波形

为了验证电网频率在正常范围内波动对基于广义积分器的谐波电流检测方法提取的三相基波电流的影响,把电源频率改为 50.5 Hz,通过谐波检测单元得到的基波电流频谱如图7所示。从图7可看出, $k=10$ 时,基波幅值为 10.7 A,谐波畸变率 D_{TH} 为 0.12%; $k=100$ 时,基波幅值为 11.25 A,谐波畸变率为 1.15%。与图5相比, k 取相同值时,畸变率基本相同, $k=100$ 时基波幅值无衰减, $k=10$ 时基波幅值衰减较严重。因此,该检测方法对电网频率波动有一定的适应性,当 k 取值较小时会使提取到的基波幅值有明显的衰减,影响检测算法的准确性。

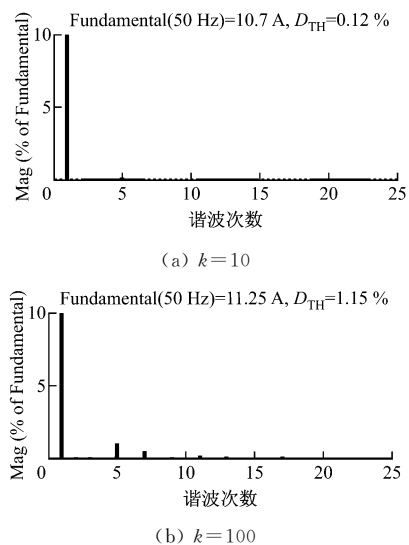


图7 电网频率波动时基于广义积分器的谐波电流检测方法得到的基波电流频谱

5 结论

针对四桥臂 APF 的谐波检测环节,提出了基于广义积分器的谐波电流检测方法,分析了该检测方法的检测原理及参数变化对检测效果的影响,得出以下结论:

(1) 电网电压稳定时,该检测方法可以较准确地检测出谐波电流。采用该方法设计谐波检测环节时应综合考虑系统快速性和精确度的要求,合理设置参数。

(2) 该检测方法用于电网频率波动频繁的供电系统时,参数 k 应适当增大,以使提取的基波电流无明显衰减,保证谐波检测的准确、可靠。

(3) 该检测方法结构简单,不存在 PLL 和低通滤波环节,在实际应用中易实现。对于电网电压畸变、电网频率波动及三相负载不平衡的情况有一定的适应性。

参考文献：

[1] GB/T 156—2007 标准电压[S].

[2] 徐亚军. 三相四线制并联型有源电力滤波器研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.

[3] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[4] 林海雪. 几种国外谐波电压标准的分析[J]. 供用电, 2008,25(3):4-7.

[5] 唐健,邹旭东,余煦,等. 三相四线制三电平三桥臂有源滤波器中点平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(24):40-48.

[6] 杨秋霞,梁雄国,郭小强,等. 准谐振控制器在有源电力滤波器中的应用[J]. 电工技术学报,2009, 24(7): 171-176.

[7] 陈艳慧,刘开培,郭书芳. 电力系统谐波检测的 p-q-r 法及其局限性[J]. 电网技术,2004, 28(13):88-91.

[8] 唐健. 三相四线制三电平三桥臂 APF 关键技术及其控制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.

[9] YUAN Xiaoming, MERK W, STEMMLER H, *et al.* Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2):523-532.

[10] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.