

# 一种基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法

李金<sup>1</sup>,张喜铭<sup>1</sup>,时伯年<sup>2</sup>,孙刚<sup>2</sup>,郭芳<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510530;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:**近年来,随着风电装机容量的不断增加、高压直流输电工程的不断投运,电力系统的电力电子化程度越来越高。而随着电力电子设备在电力系统中不断增多,电力系统的谐波特性也更为复杂。以瞬时无功功率理论为基础,提出了一种改进的谐波检测算法,该算法能够检测各个频段的正序和负序谐波,弥补了传统谐波检测算法的不足。最后,通过搭建电磁暂态仿真模型,验证了所提改进谐波检测算法的有效性。

**关键词:**谐波检测;谐波抑制;瞬时无功理论;低通滤波

**中图分类号:**TM761 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19321

## An Improved Harmonic Detection Algorithm Based on Instantaneous Reactive Power Theory

LI Jin<sup>1</sup>, ZHANG Ximing<sup>1</sup>, SHI Bonian<sup>2</sup>, SUN Gang<sup>2</sup>, GUO Fang<sup>2</sup>

(1. CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510530, Guangdong, China;

2. Beijing Sifang Automation Co. Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** In recent years, with the growth of installed wind power capacity and high voltage direct current (HVDC), more and more electrical power electronic equipment in power system are brought which brings many issues, such as complex harmonic current. Based on the instantaneous reactive power theory, a modified harmonic detection algorithm was introduced which could detect all harmonics at different frequency and sequence so as to make up the deficiency of traditional harmonic detection algorithm. The electromagnetic transient simulations based on a practical wind power system were carried out to validate the effectiveness and accuracy of the proposed harmonic detection method.

**Key words:** harmonic detection; harmonic suppression; instantaneous reactive power theory; low pass filter

风力发电因成本较低、技术成熟且环境友好等特点,在能源资源日益稀缺、气候环境进一步恶化的现状下,已经成为了一种十分具有发展前景的可再生能源技术,得到了飞速的发展<sup>[1-2]</sup>。然而,风力发电机在提供清洁持续能源的同时,也给电力系统带来了一系列的不良影响。比如风力发电场由于电力电子化程度高、运行工况复杂,时常会输出大量的谐波,这将严重影响电力系统的电能质量以及系统稳定性<sup>[3-4]</sup>。同时,随着高压直流输电的大力发展,电力系统的电力电子化程度越来越高,也使得电力系统中的谐波含量变得异常复杂,同时还会出现大量的间谐波,这些都是谐波检测技术所亟待解决的问题。

目前常用的谐波检测方法主要包括滤波器法、频率分析法、小波分析法以及基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法。

滤波器法主要包括带阻滤波器和带通滤波器法。带阻滤波器可检测出总的谐波量但不能检测出各次谐波的含量;带通滤波器虽然可以检测基波电流和各次谐波的含量,但不能检测出基波无功电流。上述方法的优点是算法结构简单,然而精确性和可靠性较差且带通和带阻滤波器在工程中都不易实现。

频率分析法通常采用离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)或快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)对谐波进行分析。

**基金项目:**中国南方电网有限责任公司科技项目(ZDKJXM20160008)

**作者简介:**李金(1979-),男,硕士,高级工程师,Email:lijin2@csg.cn

该方法虽然可以检测出各次谐波分量的幅值和相位,但由于窗宽的限制,其实时性较低,一般适用于进行离线计算,用于实时谐波检测时往往精度和可靠性较低。

基于小波变换的谐波检测方法可以检测出基波有功、无功电流和总谐波电流,但不能检测各次谐波含量,且小波变换的谐波检测方法精度和可靠性也都较差<sup>[5]</sup>。

采用瞬时无功功率理论的谐波检测方法<sup>[6]</sup>以瞬时无功功率理论为基础,通过坐标变换和相应的计算可以精确可靠的检测出系统的谐波含量,但传统的基于瞬时无功功率理论的谐波检测算法也只能检测出总的谐波含量而不能检测出各次谐波的含量和相角<sup>[7-10]</sup>,在某些需要获取特定频率和相序的谐波时将不再适用。

本文根据瞬时无功功率理论的基本原理对传统的基于瞬时无功功率理论的谐波检测算法进行了改进,提出了一种可以检测出三相电路中各个频率点的正序、负序谐波(包括整数次谐波和间谐波)的检测算法,并对其有效性进行了仿真验证。下文首先对所提出的改进谐波检测算法进行了详细的理论分析与原理研究,然后针对滤波器参数对算法检测精度的影响,给出了基于所提算法的滤波器的设计原理,最后通过 Matlab/ Simulink 仿真验证了所提算法的精确性和可靠性。

## 1 基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测方法

### 1.1 基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法

传统的电力系统控制装置的响应时间大多在数十 ms 到 s 级,而基于电力电子开关的新型控制装置的响应时间则通常在数个 ms 甚至  $\mu\text{s}$  级,远远小于传统电力系统装置的响应时间,这使得传统的功率定义难以表述电力电子装置短时间内有功和无功的变化规律<sup>[11-13]</sup>。三相电路的瞬时无功功率理论最早由日本学者赤木泰文提出,该理论完美定义了电力电子装置的瞬时功率、电压、电流等概念。基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法是以瞬时无功功率理论为基础,通过相应的坐标变换和计算给出了谐波电流实时检测方法。该方法又分为  $p$ - $q$  法和  $I_p$ - $I_q$  法,其中  $p$ - $q$  法的检测结果受电网电压的影响较大,而  $I_p$ - $I_q$  法的阻抗不受电网电压的影响,检测

结果较为精确<sup>[6]</sup>。本文对  $I_p$ - $I_q$  谐波检测法进行展开介绍,其基本原理如图 1 所示。

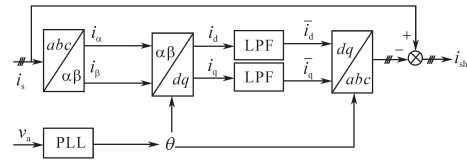


图1  $I_p$ - $I_q$ 法谐波检测原理

Fig.1 The principle of  $I_p$ - $I_q$  harmonic detection method

图 1 中  $abc/\alpha\beta$  变换、 $\alpha\beta/dq$  变换以及  $dq/abc$  变换矩阵可表示如下:

$$C_{abc/\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{\alpha\beta/dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_{dq/abc} = (C_{\alpha\beta/dq} C_{abc/\alpha\beta})^{-1} \quad (3)$$

由图 1 可知,  $I_p$ - $I_q$  谐波检测法通过锁相环获取交流系统的角频率,并以此角频率建立相应旋转速度的两相旋转坐标系。当三相交流电流被变换到此旋转坐标系后,工频量将变为直流量,频率为  $f_p$  的谐波量将变为频率为  $f_p \pm f_1$  的交流分量 ( $f_1$  为基频),再通过低通滤波器滤除这些交流量,即可输出三相工频电流在两相旋转坐标系下的直流量,最后通过反 Park 变换即可得到三相交流电流中的工频分量  $i_{a1}, i_{a2}, i_{a3}$ 。将实际电网三相交流电流  $i_a, i_b, i_c$  与基频分量作差,即可得到电网电流中的谐波分量。然而,该方法只能获得电网电流中的谐波总量,而无法获得电网电流中各次谐波的具体含量。

### 1.2 基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法

根据上述对传统  $I_p$ - $I_q$  谐波检测方法的分析可知,其核心原理是建立以工频角速度为旋转速度的两相旋转坐标系,使得三相电流基频分量在两相旋转坐标系中变为直流量,而进一步通过低通滤波器滤除谐波分量。基于上述核心原理,本文基于电网正序与负序谐波分别检测的研究思路,提出了一种实用的检测电网电流中任意频率谐波的改进谐波检测方法,该方法由正序谐波检测和负序谐波检测 2 部分组成,检测原理如图 2 所示。由图 2 可知,与传统  $I_p$ - $I_q$  法不同,在改进算法中分别建立了频率为  $f_p$  的正序和负序 2 种旋转坐标系,并将电网三相电流分别变换到这 2 个旋转坐标系中后再分别进行滤波处理。同时,与

传统  $I_p-I_q$  法相似,改进算法的坐标变换矩阵同样为式(1)~式(3),只是其中的  $\theta$  分别为  $2\pi f_p t$  和  $-2\pi f_p t$ 。

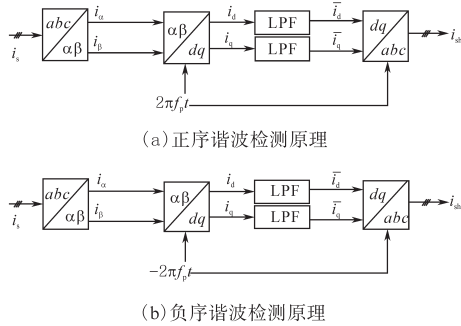


图2 本文所提改进  $I_p-I_q$  法谐波检测原理  
Fig.2 The principle of the improved  $I_p-I_q$  harmonic detection method proposed

本文以正序谐波检测环节为例对本算法的原理展开分析。假设电网电流  $i_s(s=a, b, c)$  中的正序电流包含频率为  $f_1$  的基频电流,频率为  $f_p$  的谐波电流(待检测谐波),频率为  $f_{p1}$  的谐波电流(不关心的谐波电流);负序电流包括频率为  $f_1$  的基频电流,频率为  $f_p$  的谐波电流(待检测谐波),频率为  $f_{p2}$  的谐波电流(不关心的谐波电流)。则三相交流电流经过图2a中Park变换后,在旋转频率为  $f_p$  的正序旋转坐标系统的分量  $i_d, i_q$  中包括直流分量、频率为  $f_1-f_p$  的正序旋转分量、频率为  $f_{p1}-f_p$  的正序旋转分量、频率为  $2f_p$  的负序旋转分量、频率为  $f_{p2}+f_p$  的负序旋转分量、频率为  $f_1+f_p$  的负序旋转分量。而这些分量分别对应于三相静止坐标系中频率为  $f_p, f_1, f_{p1}$  的正序分量以及频率为  $f_p, f_{p2}$  的负序分量。可见,通过坐标变换,将频率为  $f_p$  的正序谐波分量变为了直流分量,而非  $f_p$  频率的正序分量在旋转坐标系统依然是交流分量,故可通过低通滤波器滤除这些交流分量,通过合理的滤波器设计可使图2a中的  $\bar{i}_d$  和  $\bar{i}_q$  仅包括直流分量,再通过逆Park变换即可得到  $f_p$  的三相正序谐波分量。同理负序谐波检测环节也可提取出交流电流中频率为  $f_p$  的三相负序谐波电流含量。

基于上述分析发现本文所提的改进谐波方法可以准确地检测出特定频率的正序和负序谐波电流含量,较好地弥补了传统的基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的不足。

### 1.3 改进谐波检测算法传递函数及性能指标

图2中的LPF为低通滤波器,以二阶低通滤波器为例,其传递函数可表示如下:

$$G_{lp2}(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_c^2} \quad (4)$$

式中:  $\omega_c$  为一阶低通滤波器的带宽频率;  $\zeta, \omega_n$  分别为二阶低通滤波器的阻尼比和自然频率。

三相交流电流中的正序和负序分量经过图2所示的谐波检测环节后,将输出相应的三相正序和负序分量,然而正序和负序分量经过正、负序谐波检测环节后的传递函数并不相同。正、负序谐波检测环节的传递函数可分别表示如下:

$$G_{lp}^p(s) = \begin{cases} G_{lp}(s-j\omega_p) & \text{正序输入} \\ G_{lp}(s+j\omega_p) & \text{负序输入} \end{cases} \quad (5)$$

$$G_{lp}^n(s) = \begin{cases} G_{lp}(s+j\omega_p) & \text{正序输入} \\ G_{lp}(s-j\omega_p) & \text{负序输入} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\omega_p = 2\pi f_p$

式中:  $\omega_p$  为待检测谐波的角频率;  $f_p$  为待检测谐波的频率;  $G_{lp}^p(s), G_{lp}^n(s)$  分别为正、负序谐波检测环节的传递函数;  $G_{lp}(s)$  为低通滤波器的传递函数,可由一阶低通滤波器的传递函数  $G_{lp1}(s)$  与二阶低通滤波器的传递函数  $G_{lp2}(s)$  所替代。

例如,以本文的基于二阶低通滤波器设计的谐波检测算法为例,其传递函数可表示如下:

$$G_{lp1}^p(s) = \begin{cases} \frac{\omega_c^2}{(s-j\omega_p)^2 + 2\zeta\omega_n(s-j\omega_p) + \omega_c^2} & \text{正序输入} \\ \frac{\omega_c^2}{(s+j\omega_p)^2 + 2\zeta\omega_n(s+j\omega_p) + \omega_c^2} & \text{负序输入} \end{cases} \quad (7)$$

$$G_{lp1}^n(s) = \begin{cases} \frac{\omega_c^2}{(s+j\omega_p)^2 + 2\zeta\omega_n(s+j\omega_p) + \omega_c^2} & \text{正序输入} \\ \frac{\omega_c^2}{(s-j\omega_p)^2 + 2\zeta\omega_n(s-j\omega_p) + \omega_c^2} & \text{负序输入} \end{cases} \quad (8)$$

## 2 改进谐波检测算法滤波器的设计与选取原则

基于瞬时无功功率理论的谐波检测算法中包括了低通滤波器,且低通滤波器的性能直接决定了检测方法的精确性,因此低通滤波器的设计就显得格外重要。然而由于滤波器自身结构上的限制,会带来一定的信号延时,尤其是当滤波器带宽较低、阶数较高时,此时延时往往较大,然而如果滤波器带宽太高、阶数太低又可能无法达到足够的滤波效果,因此合理选择滤波器结构,优化其参数对本改进算法的性能十分重要。



### 2.1 滤波器类型选择

数字低通滤波器主要包括有限长单位冲激响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器和无限长单位冲激响应 (infinite impulse response, IIR) 滤波器, 其中, FIR 滤波器具有良好的相频特性, 然而幅频特性较差; IIR 滤波器虽然相位线性较差但具有较高精度的幅频特性。由于本算法中的低通滤波器主要是为了获取旋转坐标系中有功电流和无功电流的直流分量, 故对滤波器的相位精度没有太高的要求, 而对其幅值精度要求较高, 故本算法中的低通滤波器选为 IIR 数字滤波器。IIR 滤波器主要包括巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器以及椭圆滤波器等。其中巴特沃斯低通滤波器具有较为均衡的相位线性、衰减斜率和加载特性, 因此本文中选取巴特沃斯滤波器为例对谐波检测算法的有效性展开分析。

### 2.2 滤波器的数字化实现及带宽设计原则

以二阶巴特沃斯低通滤波器为例, 对应于式 (4) 和式 (5), 其传递函数的数字差分形式可表达如下:

$$y(n) = \omega_n^2 x(n-2) - 2\zeta\omega_n y(n-1) - \omega_n^2 y(n-2) \quad (9)$$

可见巴特沃斯低通滤波器的数字化实现非常简单。通常而言, 滤波器带宽频率对滤波器的滤波性能有着非常重要的影响, 带宽频率越高, 滤波器通带越宽; 带宽频率越低, 滤波器通带越窄。在本算法中, 为了能够检测出各个频段的谐波电流而不遗漏任何关注频段的谐波电流, 滤波器的带宽频率必须和谐波检测算法的使用场合相匹配。如果为了检测系统中各整数次谐波电流的含量, 则滤波器带宽频率应该小于 50 Hz, 以保证低通滤波器能滤除相邻次数的谐波电流。如果要以一定频率步长 (如 10 Hz) 来检测间谐波, 那么低通滤波器的带宽频率应低于相应的步长频率 (如 10 Hz)。

本方案仅包括一些简单的加减法以及乘法运算, 实现简单, 实时性优良, 将十分利于工程实现。而且本方法不仅能检测整数次谐波, 还能检测间谐波, 这一优势是常规谐波检测算法不具备的, 具有较大的实用价值。

## 3 电磁暂态仿真验证

为验证本文中谐波检测算法的精确性和可靠性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了如图 3 所示的快速谐波检测模块。图 3 中  $i_s$  为实时采样得到的

三相电流值, 含有频率 50 Hz 幅值 100 A 的基频正序电流、频率 150 Hz 幅值 10 A 的 3 倍频正序分量、频率 250 Hz 幅值 5 A 的 5 倍频负序分量以及频率 70 Hz 幅值 4 A 的负序间谐波分量, 其  $a$  相电流波形及频谱如图 4 所示, 各谐波的幅值及相角如表 1 所示。

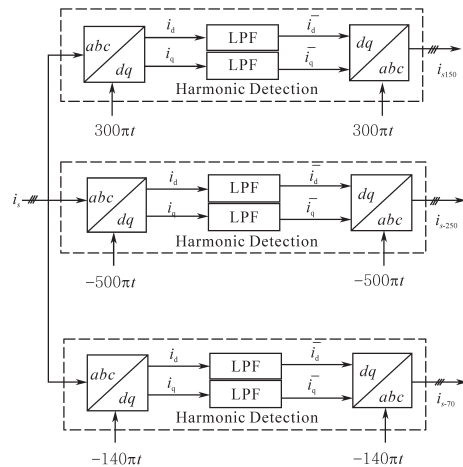


图 3 快速谐波检测算法

Fig.3 Fast harmonic detection algorithm

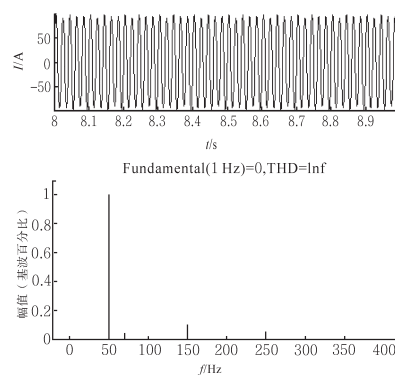


图 4 a 相电流及频谱

Fig.4 Current and spectrum of a phase

表 1 a 相电流谐波幅值及相角

Tab.1 Amplitudes and phase angles of harmonic in a phase current

频率/Hz	幅值/A	相角/(°)
150(正序)	100	0
250(负序)	10	60
50(正序)	5	120
70(负序)	4	0

图 3 中的滤波器均采用了一阶低通滤波器, 且带宽频率为 1 Hz。图中  $i_{s-150}$ ,  $i_{s-250}$  以及  $i_{s-70}$  分别为检测环节检测出的二倍频正序谐波、二倍频负

序谐波以及70 Hz的负序间谐波。其a相电流及频谱分别如图5所示,具体谐波含量如表2~表4所示。

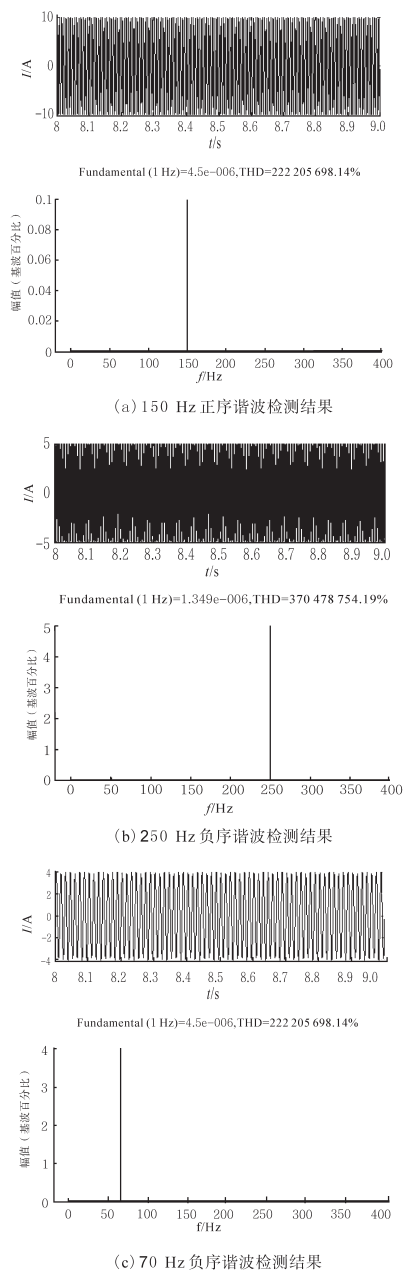


图5 谐波检测结果

Fig.5 Results of harmonic detection

表2 150 Hz 正序电流检测结果

Tab.2 Detection results of 150 Hz positive sequence current

频率/Hz	幅值/A	相角/(°)
150(正序)	10.010	60.02
250(负序)	0.006	1.20
50(正序)	0.160	0.15
70(负序)	0.020	-0.28

表3 250 Hz 负序电流检测结果

Tab.3 Detection results of 250 Hz negative sequence current

频率/Hz	幅值/A	相角/(°)
150(正序)	0.13	2.30
250(负序)	5.01	120.04
50(正序)	0.15	-1.90
70(负序)	0.25	0.87

表4 70 Hz 正序电流检测结果

Tab.4 Detection results of 70 Hz positive sequence current

频率/Hz	幅值/A	相角/(°)
150(正序)	0.15	-0.90
250(负序)	0.11	0.12
50(正序)	0.23	-1.05
70(负序)	3.99	0.03

比较图4、图5及表1~表4可知,本谐波检测算法能够准确地检测出各频率段下正、负序谐波,不仅能检测整数次谐波,还能检测间谐波,弥补了传统的基于瞬时无功功率理论谐波检测算法的缺陷。

#### 4 结论

传统的基于瞬时无功功率理论的谐波检测算法只能检测出谐波总量,且无法判定各次谐波是正序还是负序,在一些需要检测特定相序和频率谐波的情况下无法适用。本文基于瞬时无功功率理论的基本原理提出了一种新型的谐波检测算法,既能检测正序谐波又能检测负序谐波,同时还能检测包括间谐波的各个频率段的谐波含量,且结构简单、易于数字化实现,具有很强的实用价值。通过在 Matlab/Simulink 中进行仿真实验,验证了所提谐波检测算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] 江浩,孙瑜,刘辉,等. 风电经柔性直流输电系统接入电网研究综述[J]. 华北电力技术,2017,(1):1-7.
- [2] 董哲,周明,李庚银,等. 针对风电外送基地的暂态切机决策模型[J]. 电网技术,2016,40(5):1348-1354.
- [3] 孙文博,徐华利,付媛,等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制[J]. 电网技术,2013,37(6):1596-1601.
- [4] 毕天姝,孔永乐,肖仕武,等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(1):10-15.
- [5] 房国志,杨超,赵洪. 基于FFT和小波包变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):75-79.
- [6] 高文华,周娟,王子绩. 基于瞬时无功功率理论的  $i_p-i_q$  算法

(下转第106页)