

基于改进频谱叠加算法的多间谐波检测方法

孙名扬¹,王艳¹,顾叮咚²,庄卫金¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司,江苏南京 210003; 2. 东南大学电气工程学院,江苏南京 210002)

A Method for Detecting Inter-Harmonics Based on Superposition Algorithm of Modified Spectrum

SUN Mingyang¹, WANG Yan¹, GU Dingdong², ZHUANG Weijin¹

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210002, Jiangsu, China)

ABSTRACT: In order to improve the accuracy of multi-harmonic detection, this paper improves the multi-component spectral superposition algorithm, and proposes a unified calculation formula for arbitrary inter-harmonics near the harmonic wave based on the higher order equation of one variable Vieta theorem. Firstly, the spectral leakage values near the fundamental and harmonic waves after multiple inter-harmonic DFTs are vectorially superimposed to obtain the inter-harmonic correlative equations. Secondly, according to the unified calculation formula, the complex equations are solved and the estimated frequency of inter-harmonics is obtained. Finally, the amplitude and phase of each frequency is obtained by combining the estimated frequency with the initial hypothesis signal. The experimental examples show that the proposed method can accurately identify multiple inter-harmonics near the base wave and harmonic wave, and effectively solve the limitation of the number and type of inter-harmonics in the traditional detection and identification of inter-harmonics.

KEY WORDS: Harmonic; detecting inter-harmonics; main lobe interference; fast Fourier transform; equation of higher degree

摘要: 为提高多组非对称间谐波的检测精度,对多分量频谱叠加算法加以改进,基于一元高次方程韦达定理,提出了对基波及谐波附近多个非对称间谐波的统一计算公式。首先将多个间谐波 DFT 后在基波及谐波附近的频谱泄露值进行矢量叠加,得出间谐波相关方程组;然后根据统一计算公式

求解该复杂方程组,得出间谐波估计频率;最后结合估计频率和初始假设信号,能够得到各个频率对应的幅值及相位。实验算例表明,该间谐波检测方法能准确识别基波及谐波附近的多个非对称间谐波,能够有效解决传统检测识别间谐波时对间谐波存在个数及类型的限制。

关键词: 谐波;间谐波检测;主瓣干扰;快速傅里叶变换;高次方程求解

随着我国大力推进能源改革,风电、光伏等分布式新能源得到了迅速发展,其引入了大量诸如整流器、逆变器、SVG、UPFC 等电力电子元件,使得传统电网非线性负载数量增多。系统运行时,非线性负载的电感与回路中的电容引起铁磁谐振,极易在基波及谐波附近产生间谐波^[1]。系统中间谐波的含量直接影响了系统及受端设备的稳定运行,增加了滤波装置的复杂程度,造成大量间谐波损耗的同时也为继电保护的可靠动作带来了挑战。此外,间谐波如果造成次同步振荡将会对设备造成严重损坏,对电力系统造成难以估量的损失^[2]。因此,正确检测电力系统信号中间谐波的成分在当下环境中尤为重要。

目前,国内外已经开展了许多关于间谐波检测的研究。研究比较成熟且应用广泛的基于傅里叶变换的谐波及间谐波检测,该算法利用傅里叶变化,获取与谐波及间谐波有关的频率、幅值、相位等参数,再通过评估方法进行检测。在此基础上也衍生出了一系列改进方法。单峰谱线插值算法计算简单,但仅考虑了单个间谐波的检测,适用范围较小,当基波及谐波附近出现多个间谐波时识别失效。传统的加

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5108-202055023A-0-0-00)。

Project Supported by the Science and Technology Program of the SGCC Headquarters(5108-202055023A-0-0-00).

窗插值算法仅在检测单个间谐波或多个相距较远的间谐波时分辨较好,当间谐波相距较近时,受间谐波频谱泄露、栅栏效应和主瓣干涉的影响,识别会出现较大误差^[3-4]。文献[5]中提出改进的多峰谱线插值算法,但同样不能解决相距较近的多个间谐波的检测问题。此外,还有结构简单、跟踪能力强的 Adaline 方法,但此方法需要提前知道间谐波的个数频率,具有较大的局限性^[6-7]。通过分解信号进行识别的传统小波 EMD 算法,无法从根本上解决频谱混叠问题,并且无法准确识别高次频率的间谐波^[8]。prony 算法虽对精度有较高的识别度,但对噪声较为敏感^[9-10]。

当下存在方法均在精确检测多相近间谐波问题上存在局限。本文主要针对这一问题,基于对称单峰谱线插值算法,构建了基波和谐波附近多个非对称简谐波求解模型,提出了一种基于高次方程求解的间谐波频谱叠加算法。在采用 IEC 推荐的 10 周期采样长度的测量标准下,利用 DFT 对信号进行以 5 Hz 为分辨率的频谱分析;其次各分量将在不同谐波处泄露的频谱幅值进行矢量叠加,建立与间谐波的相关方程组,通过该方程组得出与各间谐波相关的参数;最后,结合预设的初始信号表达式得出最后间谐波的各项成分含量。该方法无需提前识别信号中所含间谐波的个数,且对间谐波的存在形式无特定要求,具有较好的普适性。经仿真及实验验证,该方法能够在 IEC 规定的采样标准下较准确地对基波及谐波附近的间谐波进行识别和检测。

1 单峰谱线插值算法原理

1.1 单峰谱线插值算法的基本原理

单峰谱线插值算法是通过间谐波附近频谱泄露的幅值加权,解出待求间谐波的频率,从而进一步求得间谐波幅值、相位的算法^[11-13]。

电力系统中离散采样后信号可表示为式(1):

$$y(n) = \sum_{i=1}^M A_i \cos(2\pi \frac{f_i}{f_s} n + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: M 为信号中含有不同频率的个数; f_s 为采样频率; f_i , A_i , φ_i 分别为对应分量的频率、幅值、相位; $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ (N 为总采样点数)。

利用 DFT 对该信号进行傅里叶变换后有式(2):

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (2)$$

式中: $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

利用欧拉公式对式(1)进行展开,并代入式(2)可得式(3):

$$Y(k) = \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{2N} A_i e^{j\varphi_i} \frac{\sin[\pi(k-f_i/\Delta f)]}{\sin[\pi(k-f_i/\Delta f)/N]} e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k-f_i/\Delta f)} + \frac{1}{2N} A_i e^{-j\varphi_i} \frac{\sin[\pi(k+f_i/\Delta f)]}{\sin[\pi(k+f_i/\Delta f)/N]} e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k+f_i/\Delta f)} \right] \quad (3)$$

式中: Δf 为频率分辨率, $\Delta f = f_s/N$ 。

忽略负频点处的旁瓣影响,则有式(4):

$$Y(k) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{2N} A_i e^{j\varphi_i} \frac{\sin[\pi(k-f_i/\Delta f)]}{\sin[\pi(k-f_i/\Delta f)/N]} e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k-f_i/\Delta f)} \quad (4)$$

由于采样点通常远大于 1,利用等价无穷小替代式(4)可变为式(5):

$$Y(k) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{2\pi} A_i e^{j\varphi_i} \frac{\sin[\pi(k-f_i/\Delta f)]}{k-f_i/\Delta f} e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k-f_i/\Delta f)} \quad (5)$$

考虑到实际采样过程中,对谐波进行同步采样的难度很大,因此所求频率 f_x 通常不落在离散谱线频点上。利用单峰谱线插值算法,即对于单个间谐波在基波和谐波处的泄露频谱谱线,如果知道最大泄露频率幅值 $|Y(k_1)|$ 和次最大的泄露频率幅值 $|Y(k_2)|$,且有 $k_2 = k_1 + 1$,即有式(6):

$$\frac{|Y(k_1)|}{|Y(k_2)|} \approx \frac{k_2 - f_x/\Delta f}{f_x/\Delta f - k_1} \quad (6)$$

化简后可根据式(7)推导得出所求间谐波的频率 f_x 。

$$f_x = (k_1 + \frac{|Y(k_2)|}{|Y(k_1)| + |Y(k_2)|}) \Delta f \quad (7)$$

若有 $k_1 = k_2 + 1$,推导过程同上。

1.2 对称双间谐波插值检测基本原理

单峰谱线插值算法能在存在单个间谐波时,准确快速地计算出待求间谐波的频率值,从而得出间谐波的各项参数。但当存在多个间谐波时,尤其是当两个间谐波相距较近时,由于存在频谱泄露和主瓣干涉现象,导致离散谱线频点上的频率幅值为各间谐波泄露频谱的叠加,如图 1 所示。

此时,即便采样同步时,传统的单峰谱线插值算法也无法把相互干涉的间谐波分离,难以得到准确的间谐波频率。为此,采用间谐波的频谱叠加算法来改进传统的单峰谱线插值算法。该算法基本思路是通过各离散谱线频点构建方程组,通过求解

方程组得到各间谐波的相关参数。

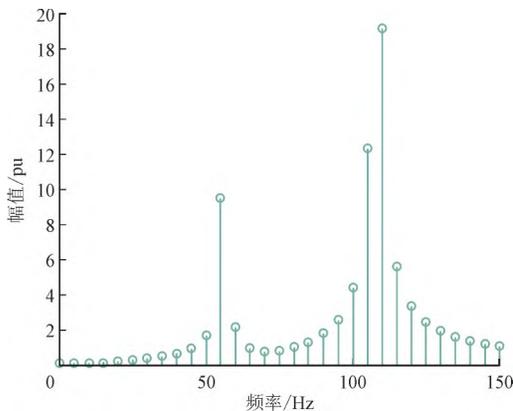


图1 多个间谐波泄露频谱图

Fig.1 Main lobe interference schematic of Inter-harmonics

由式(5)可知,单个间谐波的泄露频谱可表示为

$$Y(k) = \frac{1}{2\pi} A_x e^{j\varphi_x} \frac{\sin[\pi(k - f_x/\Delta f)]}{k - f_x/\Delta f} e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k - f_x/\Delta f)} \quad (8)$$

即

$$Y(k) = \frac{C_x}{D_x} \quad (9)$$

$$C_x = \frac{1}{2\pi} A_x e^{j\varphi_x} \sin[\pi(k - f_x/\Delta f)] e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k - f_x/\Delta f)} \quad (10)$$

$$D_x = k - f_x/\Delta f \quad (11)$$

式(9)表明,频率为 f_x 的间谐波在基波或谐波 $k_0\Delta f$ 、 $(k_0+1)\Delta f$ 处的泄露频谱值分别为

$$Y(k_0) = \frac{C_{x,k_0}}{D_x} \quad (12)$$

$$Y(k_0+1) = \frac{C_{x,k_0+1}}{D_x+1} \quad (13)$$

当采样点数 N 足够大时, C_x 的值与 k 无关,则式(12)、式(13)可简化为

$$Y(k_0) = \frac{C_x}{D_x} \quad (14)$$

$$Y(k_0+1) = \frac{C_x}{D_x+1} \quad (15)$$

选取关于基波或谐波点对称的频点。利用频谱叠加算法,即离散谱线频点处的谱线幅值为各间谐波泄露谱线幅值的叠加列出方程组。由于谱线幅值可通过DFT直接获得,通过求解方程组可获得与间谐波有关参数 C_x 、 D_x 的值,进一步即可计算出所求间谐波的频率。

至此,虽然单个间谐波或对称间谐波对的检测

问题得到了很好解决,然而,现实情况中多组非对称间谐波共存才是常态。如何准确检测多组非对称间谐波共存电信号,本文提出了基于高次方程求解的间谐波频谱叠加算法。

2 基于高次方程求解的间谐波频谱叠加算法

2.1 基波/谐波附近存在单个间谐波

基频同步采样前提下,基波/谐波仅在自身频率处存在频谱值,不会产生频谱泄露现象。此时,基波/谐波的频谱值为

$$Y'(k_0) = Y(k_0) + A \quad (16)$$

式中: A 为基波/谐波自身频率的频谱值; k_0 为表征基波/谐波频率的参数。

由于基波/谐波附近频率 $Y(k_0+1)$ 、 $Y(k_0-1)$ 不受基波/谐波频谱泄露的影响,间谐波 f_x 在各附近频率处频谱值满足以下关系:

$$\begin{cases} Y(k_0-1) = \frac{C}{D_{k_0-1}} = \frac{C}{D_{k_0}-1} \\ Y(k_0+1) = \frac{C}{D_{k_0+1}} = \frac{C}{D_{k_0}+1} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $C = \frac{1}{2\pi} A_x e^{j\varphi_x} H(k - f_x/\Delta f)$; $D_{k_0} = k_0 - f_x/\Delta f$ 。

由方程组(17)可以求出 C 、 D_{k_0} ,进而待求间谐波在基波/谐波处的频谱值可由式(18)求得。

$$Y(k_0) = \frac{C}{D_{k_0}} \quad (18)$$

通过排序法得出 $Y(k_0+1)$ 、 $Y(k_0)$ 、 $Y(k_0-1)$ 大小后,利用1.1节所述单峰谱线插值算法即可得出所求间谐波 f_x 的频率。

最后代入原表达式(3),可求出各频率的幅值和相位。

2.2 基波/谐波附近存在多个间谐波

实际工程运用中,2.1节中所阐述的单个间谐波情况并不常见,往往同时存在多个距离相近的间谐波^[14]。

传统频谱叠加算法在计算时存在很多限制,因此识别上限通常为两个间谐波对。构建求解多个间谐波的统一模型在工程中具有实际意义,通过求解该模型,可解决对间谐波种类及数量的限制问题,具体模型如下所示。

当存在 N 个间谐波时,基波/谐波附近 $2N$ 个频点处的频谱值可表达如下:

$$\begin{cases} Y(k_0 - N) = \frac{C_1}{D_1 - N} + \dots + \frac{C_k}{D_k - N} + \dots + \frac{C_N}{D_N - N} \\ \vdots \\ Y(k_0 - 1) = \frac{C_1}{D_1 - 1} + \dots + \frac{C_k}{D_k - 1} + \dots + \frac{C_N}{D_N - 1} \\ Y(k_0 + 1) = \frac{C_1}{D_1 + 1} + \dots + \frac{C_k}{D_k + 1} + \dots + \frac{C_N}{D_N + 1} \\ \vdots \\ Y(k_0 + N) = \frac{C_1}{D_1 + N} + \dots + \frac{C_k}{D_k + N} + \dots + \frac{C_N}{D_N + N} \end{cases} \quad (19)$$

$$A = \begin{bmatrix} -(-N)^0 Y(-N) & -(-N)^1 Y(-N) & \dots & -(-N)^{N-1} Y(-N) & (-N)^0 & (-N)^1 & \dots & (-N)^{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -(-1)^0 Y(-1) & -(-1)^1 Y(-1) & \dots & -(-1)^{N-1} Y(-1) & (-1)^0 & (-1)^1 & \dots & (-1)^{N-1} \\ -1^0 Y(1) & -1^1 Y(1) & \dots & -1^{N-1} Y(1) & 1^0 & 1^1 & \dots & 1^{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -N^0 Y(N) & -N^1 Y(N) & \dots & -N^{N-1} Y(N) & N^0 & N^1 & \dots & N^{N-1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B = \begin{bmatrix} D_1 D_2 \dots D_N \\ \sum_{i=1}^N \frac{D_1 D_2 \dots D_N}{D_i} \\ \vdots \\ D_1 + D_2 + \dots + D_N \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N C_i \sum_{k=C_{n-1}} \prod D_m \dots L \dots D_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C = [(-k)^N Y(k)] \quad (23)$$

通过一元高次方程的韦达定理可知,对于任意一个 N 次方程 $\sum A_i x_i$,其全部 N 个根 x_i 有如下 N 个表达式^[5]:

式(24)所示方程组的左侧与上述矩阵 B 表达式吻合,为简化方程在此假设 $A(0) = 1$,可以得出该特定一元 N 次方程的 N 个系数。

该特定方程得出的 N 个解为上述矩阵 B 中 N 个参数 D 的值,再代入矩阵 B 的剩余式中,即可求解关于 C 的线性方程组。

$$\begin{cases} \sum x_i = (-1)^1 \frac{A(1)}{A(0)} \\ \sum x_i x_j = (-1)^2 \frac{A(2)}{A(0)} \\ \vdots \\ \prod x_i = (-1)^n \frac{A(n)}{A(0)} \end{cases} \quad (24)$$

最后通过 2.1 小节中所提的方法可得出所求信号的所有频率及所对应的幅值和相位。

2.3 间谐波的幅值/相位求解

如 1.1 节式(5)所示:

由于解此方程组较为复杂,可将方程组简化为

$$A \cdot B = C \quad (20)$$

式中 A 、 B 、 C 的表达分别为式(21)~式(23)。

分解后的矩阵相乘格式具有以下特征:

1) 矩阵 B 的前 N 个元素只与参数 D 相关。

2) 当参数 D 已知时,矩阵 B 的后 N 个元素是参数 C 的相关线性组合。

$$Y(k) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{2\pi} A_i e^{j\varphi_i} \frac{\sin[\pi(k - f_i/\Delta f)]}{k - f_i/\Delta f} e^{-j\frac{N-1}{N}\pi(k - f_i/\Delta f)} \quad (25)$$

式(25)对原始信号进行了假设,通过 1.1、1.2 节可以求得各间谐波的频率值。结合式(5)和左侧各离散频谱点处的相量,选取并求解适当个数的方程,即可得到各间谐波所对应的 $A_i e^{j\varphi_i}$ 值。该式子的模长为对应间谐波的幅值,角度为所对应的相位。

3 算例分析

为验证本文提出算法的有效性和可推广性,设置如下算例。首先验证了本文提出的基于高次方程求解的间谐波频谱叠加算法在传统对称间谐波情况下依然适用,其次验证了本文提出算法能解决实际情况中多组非对称间谐波共存的电信号,并从频率、幅值、相位等不同维度详细分析了算法检测误差。

算例中采取的是 IEC 推荐的 10 周期采样长度的测量标准,采样频率 f_s 为 3 200 Hz,采样点数为 640 点,频率分辨率 Δf 为 5 Hz^[6],信号中存在一组间谐波对,各成分含量如表 1 所示。

表 1 存在一组间谐波对的实验信号成分含量表
Table 1 Table of signal component content of the experimental signal containing a set of inter-harmonic

频率/Hz	幅值/%	相位/(°)
50	100	60
45.7	3	45
54.3	3	45

表1中的实验信号为基波和分布在其附近的一对间谐波,此类分布为工程中常见情况,具有实际工程意义。

针对包含一组间谐波对的电信号采用传统的FFT算法进行识别,其识别内容从频率识别、幅值识别和相位识别三个维度展开,结果如表2所示。

表2 存在一对间谐波对的实验信号传统FFT分析结果
Table 2 The analysis of the experimental signal containing a pair of inter-harmonic signals by the traditional FFT method

频率/Hz	幅值/%	相位/(°)
49.8	100.428	30.06
43.95	2.082	-16.74
52.73	2.076	106.55

根据实验结果可以得出,传统FFT对基波的识别能力明显比对间谐波识别能力强,其对基波频率识别误差控制在0.4%,对基波幅值识别误差控制在0.428%,而对基波相位识别的误差较大,相差接近一倍。此外,传统FFT对间谐波的识别结果收效甚微,其频率识别的误差分别飙升为3.98%和2.89%,幅值识别的误差之大较难应用于工程实践,分别为30.6%和30.8%,相位识别误差更大。

采用本文所提出的间谐波算法对原模拟信号进行检测,得到识别信号的间谐波的频率、幅值、相位参数,同时结合原信号进行误差分析,得出的实验结果如表3所示。

表3 存在一对间谐波对的实验信号本文算法分析结果及其误差

Table 3 The analysis results and errors of the experimental signal containing a pair of inter-harmonic signals using the proposed algorithm

频率/Hz	频率误差	幅值/%	幅值误差	相位/(°)	相位误差
100	0	100.01	1.00×10^{-4}	59.82	3.00×10^{-3}
45.70	0	3.025	8.33×10^{-3}	44.88	2.67×10^{-3}
54.30	0	3.000	0	44.99	2.22×10^{-4}

由表3可知,本文算法能对基波及谐波附近的一对间谐波对进行准确识别,对于一对间谐波对的频率估计几乎零误差,幅值和相位误差都可降低至0.1%数量级。实验结果表明,对于工程中常见的存在一对间谐波对的情况,本文提出的算法能进行高精度识别。

为进一步验证本算法的可推广性,本文还设置了基波/谐波附近存在多个间谐波的场景,该信号各

成分含量如表4所示。

表4 存在四个间谐波的实验信号成分含量表
Table 4 Table of component content of the experimental signal containing four inter-harmonics

频率/Hz	幅值/%	相位/(°)
100	100	60
85.5	3	30
97.9	2.5	60
104.5	3	120
115.7	5	120

实验中的信号为二次谐波和分布在其附近的多个临近间谐波,频率、幅值、相位设置参照实际电弧炉信号进行设置^[17-20],具有现实意义。

针对包含四个间谐波的电信号采用传统的FFT算法进行识别,其识别内容从频率识别、幅值识别和相位识别三个维度展开,结果如表5所示。

表5 存在四个间谐波对的实验信号传统FFT分析结果
Table 5 The analysis results of the experimental signal containing four inter-harmonics by the traditional FFT method

频率/Hz	幅值/%	相位/(°)
96.68	98.819	59.69
79.1	2.508	100.02
90.82	2.001	172.89
99.61	2.193	-146.64
111.33	4.723	122.15

根据实验结果可以得知,相比前一组实验,传统FFT对基波频率的识别误差已经从0.4%增加至3.32%,其相对误差量飙升8倍。从幅值的维度观察,其识别误差从0.428%增加至1.181%,相对误差为原来的2.76倍。因此,可以推断当间谐波信号的个数增加后,传统的FFT算法对基波的识别能力也有了显著的下降。

此外,当间谐波信号个数增加后,传统FFT算法对间谐波的识别能力数据支撑如下。传统FFT对间谐波的识别结果误差依然很大,其频率识别的误差分别为7.48%、7.23%、4.68%和3.78%,相比前一组实验的3.98%和2.89%,依然没有得到改善。其幅值识别误差分布在5%~27%不等,但都在5%以上;与此同时,其相位识别误差分布在1.79%到222.2%不等,波动较大,难以应用于工程实践。可以推断当间谐波信号的个数增加后,传统的FFT算法对间谐波的识别能力也并没有得到改善。

综上,无论是在仅有一组间谐波对的情况下,

还是存在多个间谐波时,传统的 FFT 对基波和间谐波的识别能力都十分有限。

实验采用本文所提出的宽频谐波检测算法对包含多间谐波的原模拟电信号进行检测,得到识别信号的间谐波的频率、幅值、相位参数,同时结合原信号进行误差分析,得出的实验结果如表 6 所示。

表 6 存在四个间谐波的实验信号成分含量表

Table 6 Table of component content of the experimental signal containing four inter-harmonics

频率/Hz	频率误差	幅值/%	幅值误差	相位/(°)	相位误差
100	略	99.275	7.25×10^{-3}	59.95	8.33×10^{-4}
85.48	2.34×10^{-4}	2.996	1.33×10^{-3}	30.74	2.47×10^{-2}
98.22	3.27×10^{-3}	2.898	3.40×10^{-2}	62.03	3.38×10^{-2}
104.61	1.05×10^{-3}	2.927	2.43×10^{-2}	117.02	2.48×10^{-2}
115.69	8.64×10^{-5}	5.440	8.80×10^{-2}	122.32	1.93×10^{-2}

其中本文算法与 FFT 算法针对频率检测的误差对比图如图 2 所示。

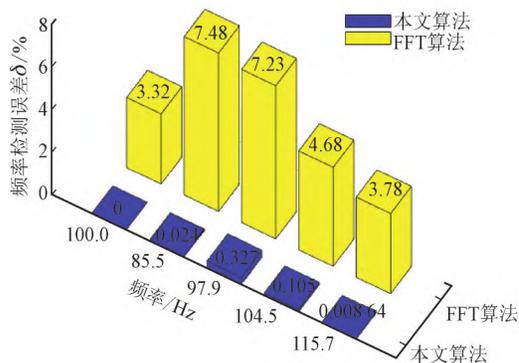


图 2 不同算法误差对比图

Fig.2 Comparison of errors of different algorithms

根据图 2 可知,针对当下电力系统中广泛存在的含有间谐波的电信号,本文算法的频率检测误差远远小于传统 FFT 算法的频率检测误差。

此外,由表 6 可知,本文算法能对基波及谐波附近的间谐波进行准确识别,其准确度表现不仅仅局限于频率检测,还包括幅值检测、相位检测等不同维度。对于四个间谐波频率误差可降低至 0.1% 数量级,幅值和相位误差都可降低至 1% 数量级,相比传统 FFT 得到显著改善。

与此同时,相比前一组实验只有一组间谐波对,本实验对于包含多个间谐波的电信号进行三个维度的准确识别也证明了本文提出的统一模型和算法具有较好的普适性,能在工程实际中推广。

不可忽视的一点是,随着间谐波个数的增加,

算法的准确度略有降低,这是由于方程解随着解方程组个数增加而更加敏感的性质所导致的。因此在实际运用中需加以考虑。

4 结语

本文提出了基于改进频谱叠加算法的多间谐波检测方法,此方法能够较为精确地分离出相距较近的基波及谐波附近的多个非对称间谐波,能较好解决传统频谱叠加算法对检测间谐波的存在个数和分布限制等问题。根据实例验证,该算法模型统一,计算快速,结果精确,能够较好满足实际工程中对间谐波检测的要求。

但方程的求解过程存在固有偏差,本文所提算法的精度随着识别间谐波个数的增加而降低,在实际运用需考虑对频率误差进行修正。

参考文献

- [1] 樊陈,姚建国,常乃超,等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16):1-8, 57.
FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Discussion on wide-frequency measurement technology for power electronized power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):1-8, 57.
- [2] 吴艳平,姚建国,常乃超,等. 多功能宽频测量装置的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20):136-141.
WU Yanping, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Design and implementation of multi-functional wide-frequency measurement device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 44(20):136-141.
- [3] 聂一雄,彭显刚,戴乔旭,等. 谐波测量的改进 FFT 插值算法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(9):91-97, 102.
NIE Yixiong, PENG Xiangang, DAI Qiaoxu, et al. Improved FFT interpolation algorithm for harmonic measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):91-97, 102.
- [4] 赵帅旗,肖辉,李文俊,等. 基于多谱线插值法和复调制细化法的电力系统谐波分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18):10-15, 24.
ZHAO Shuaiqi, XIAO Hui, LI Wenjun, et al. Harmonic analysis of power system based on multi-spectral interpolation and complex modulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(18):10-15, 24.
- [5] 陶顺,郭傲,赵蕾,等. 基于六项最快旁瓣衰减速度窗和

- 六谱线插值算法的谐波间谐波检测方法[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):110-116.
- TAO Shun, GUO Ao, ZHAO Lei, et al. Harmonic detection method of inter-harmonics based on six term window functions with maximum side lobe decay speed and six-spectrum-line interpolation algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 110-116.
- [6] SARKAR A, CHOUDHURY S R, SENGUPTA S. A self-synchronized ADALINE network for on-line tracking of power system harmonics[J]. Measurement, 2011, 44(4): 784-790.
- [7] 王小华,何怡刚.一种新的基于神经网络的高精度电力系统谐波分析算法[J].电网技术,2005,29(3):72-75.
- WANG Xiaohua, HE Yigang. A new neural network based power system harmonics analysis algorithm with high accuracy[J]. Power System Technology, 2005, 29(3):72-75.
- [8] 季青川,刘鸣,毕伟,等.改进小波包与EMD的微电网谐波检测研究[J].电力电子技术,2020,54(12):89-92.
- Ji Qingchuan, LIU Ming, BI Wei, et al. Research on harmonic detection of microgrid based on improved wavelet packet and EMD[J]. Power Electronics, 2020, 54(12):89-92.
- [9] 王梦昊,李开成,刘畅,等.基于改进VMD去噪的Prony-GSO联合谐波检测方法[J].电测与仪表,2020,57(24):101-107.
- WANG Menghao, LI Kaicheng, LIU Chang, et al. Prony-GSO combined harmonic detection method based on VMD de-noising[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24):101-107.
- [10] XU Yanchun, DU Yufei, LI Zhenhua, et al. Inter-harmonic parameters estimation in power grid based on accelerated PSO and T5R11 window[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(6): 883-894.
- [11] 张金平,李建立,段晨.计及负频率影响的新能源发电低频间谐波检测方法[J].电测与仪表,2020,57(2):95-100.
- ZHANG Jinping, LI Jianli, DUAN Chen. Low frequency interharmonic detection method for renewable energy generation with negative frequency contribution[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 95-100.
- [12] 肖先勇,王楠,刘亚梅.基于多项式逼近的单峰谱线插值算法在间谐波分析中的应用[J].电网技术,2008(18):57-61.
- XIAO Xianyong, WANG Nan, LIU Yamei. Application of polynomial approximation based single peak spectral lines interpolation algorithm in interharmonic analysis[J]. Power System Technology, 2008(18):57-61.
- [13] 段晨,杨洪耕.临近基波/谐波的间谐波检测算法[J].电网技术,2019,43(5):1818-1825.
- DUAN Chen, YANG Honggeng. An algorithm for detecting interharmonics adjacent to fundamental/harmonic components[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1818-1825.
- [14] 刘灏,李珏,毕天姝,等.基于PMU相量的次/超同步间谐波识别方法[J].电网技术,2017,41(10):3237-3245.
- LIU Hao, LI Yu, BI Tianshu, et al. Subsynchronous and supersynchronous inter-harmonic identification method based on phasor measurements[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3237-3245.
- [15] 彭海静.基于Excel求高次方程的解[J].计算机应用与软件,2006(2):142-144.
- PENG Haijing. The solution of higher degree equation based on Excel[J]. Computer Applications and Software, 2006(2):142-144.
- [16] 王泽,杨洪耕,王佳兴,等.消除负频率影响的低频间谐波快速检测方法[J].电力自动化设备,2015,35(3):140-145,156.
- WANG Ze, YANG Honggeng, WANG Jiaying, et al. Rapid low-frequency interharmonic detection with negative-frequency elimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3):140-145, 156.
- [17] 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.
- [18] 张晓,刘振中,孟凡婷,等.一种用于谐波检测的改进虚拟磁链定向方法[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):135-141.
- ZHANG Xiao, LIU Zhenzhong, MENG Fanting, et al. An improved virtual flux linkage orientation method for harmonic detection[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1):135-141.
- [19] 方昕玥,王斌,喻敏,等.交流电弧炉的间谐波检测及状态判断[J].电测与仪表,2020,57(13):137-143.
- FANG Xinyue, WANG Bin, YU Min, et al. Inter-harmonic detection and state judgment of AC arc furnace [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13):137-143.

(下转第15页)

- hybrid DC circuit breaker in MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):309-319.
- [18] 丁晓,汤广福,韩民晓,等. IGBT串联混合式高压直流断路器分断应力分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1846-1856.
DING Xiao, TANG Guangfu, HAN Minxiao, et al. Analysis of the turn-off stress on hybrid DC circuit breaker with IGBT series valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1846-1856.
- [19] 刘晨阳,王青龙,柴卫强,等. 应用于张北四端柔直工程±535 kV混合式直流断路器样机研制及试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 77-81.
LIU Chenyang, WANG Qinglong, CHAI Weiqiang, et al. Development and experimental research of ± 535 kV hybrid DC circuit breaker prototype applied in Zhangbei four-terminal VSC-HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 77-81.
- [20] 陈龙龙,张宁,汤广福,等. 混合式高压直流断路器例行试验方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3193-3199.
CHEN Longlong, ZHANG Ning, TANG Guangfu, et al. Routine test method for hybrid high voltage direct current breaker[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3193-3199.
- [21] DL/T 2113-2020. 混合式高压直流断路器试验规范[S].
- [22] 汤广福,王高勇,贺之渊,等. 张北500kV直流电网关键技术及设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [23] 张北柔性直流电网示范工程500 kV混合式直流断路器试验方案[Z]. 国家电网公司, 2018.
- [24] 魏晓光,高冲,罗湘,等. 柔性直流输电电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-102.
WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [25] 张福轩,郭贤珊,常忠廷,等. 张北关键设备短时电流试验方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 3638-3646.
ZHANG Fuxuan, GUO Xianshan, CHANG Zhongting, et al. Short-time current test method of key equipment for Zhangbei DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 3638-3646.

收稿日期: 2021-08-11。

作者简介:

王秀环(1984—),女,硕士,高级工程师,长期从事大功率电力电子试验技术;

周军川(1976—),男,硕士,工程师,长期从事电力电子装备试验技术研究;

靳祖磊(1983—),男,本科,工程师,长期从事电力电子装备试验技术研究;

孙立波(1982—),男,本科,工程师,长期从事电力电子装备试验技术研究;

陈二松(1980—),男,本科,高级工程师,主要从事材料技术及检测应用方面的研究工作。

(编辑 徐花荣)

(上接第7页)

- [20] 李强,王博强,王子豪.一种基于双窗宽滑动滤波的 i_p-i_q 谐波检测算法[J].电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 23-28.
LI Qiang, WANG Boqiang, WANG Zihao. An i_p-i_q harmonic detection algorithm based on double window width moving filters[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 23-28.

作者简介:

孙名扬(1979—),男,本科,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;

王艳(1977—),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;

顾叮咚(1999—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化,电能质量;

庄卫金(1978—),男,本科,高级工程师,研究方向为电力系统自动化。

(编辑 冯露)

收稿日期: 2021-06-01。