

# 电网谐波测量方法评述

金雄飞,乐秀璠

(河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:** 谐波测量在电力系统中有重要的地位和作用。针对目前国内外学者提出的一些谐波测量原理、方法进行了分类和评述,指出了这些方法的原理、性能、以及应用场合,并对这些方法的优缺点进行了比较。最后对谐波测量方法的发展趋势和研究动向提出了看法。

**关键词:** 谐波测量; 傅立叶变换; 瞬时无功功率; 小波分析; 神经网络

**中图分类号:** TM71      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2003)08-0011-04

## 1 引言

近年来,由于电力电子技术的飞速发展,各种电力电子变流装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛,谐波造成的危害日益严重,影响了供电的质量,对电力设备的危害尤其严重,主要表现为:过负荷和发热,增加介质应力和过电压,干扰和危害以及破坏电子设备和保护控制设备的性能和正常工作<sup>[1]</sup>。因而,在谐波存在的情况下如何测量功率和谐波电流等有关电气量,既是一个非常实际的问题,也是一个基础的理论问题。谐波问题包括畸变波形的分析方法、谐波源分析、谐波的影响及危害、电网谐波潮流计算、谐波测量及有谐波时各种电流量的测量方法及手段、谐波补偿和抑制、谐波限制标准等问题<sup>[2]</sup>。谐波测量是谐波问题的一个重要组成部分,也是研究分析谐波问题的主要依据和出发点。

本文对目前一些常用的谐波测量方法,根据测量原理的不同,分成以下几类:(1)基于傅立叶变换理论;(2)基于瞬时无功功率理论;(3)基于小波变换理论;(4)基于神经网络理论。同时,对这些方法的原理、性能、特点、局限性进行了分析讨论。

## 2 基于傅立叶变换的测量方法

采用傅立叶级数对非正弦连续时间周期函数进行分析是谐波分析的最基本方法。实际上经常把连续时间信号的一个周期  $T$  等分成  $N$  个点,在等分点进行采样而得到一系列离散时间信号,然后采用离散傅立叶变换(DFT)或快速傅立叶变换(FFT)的方法进行谐波分析<sup>[1,3]</sup>,最终得出所需要的谐波电流。使用此方法测量谐波,精度较高,功能较多,使用方便,是当今应用最广泛的一种方法,其缺点是需要一定时间的电流值,且需要进行两次变换,计算量大,需花费较多的计算时间,从而使得该检测方法具有较长时间的延迟,检测的结果实际上是较长时间前的谐波电流,实时性不好。而且在采样过程中,当采样频率不是信号频率的整数倍时,使用该方法会产生频谱泄漏现象和栅栏效应,使计算出的信号参数(即频率、幅值和相位)不准确,无法满足准确的谐波测量要求,因此必须对算法进行改进。

文献[4]利用加窗插值算法对FFT的结果进行修正,使之应用于电力系统谐波测量中。文中给出了不同的窗函数(如矩形窗、海宁窗、哈明窗、布莱克曼窗、布莱克曼窗—哈里斯窗等)的插值算法。布莱

## Diagnosis of fuzzy neural network for rotating rectifier faults of generators with brushless excitation

LIU Nian<sup>1,3</sup>, XIE Chi<sup>2</sup>

(1. Electric Information College, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Department of Measurement & Control Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Fuzzy neural network, which is a convenient artificial intelligent processing system, is made up of fuzzy logic and neural network. It has the merits of fuzzy technology and neural network technology. So this kind of diagnosis system can be used widely in diagnosing fault in power system. The fuzzy neural network of detecting the fault conditions of rotating rectifiers in synchronous generators with brushless excitation is studied in this paper. The paper introduces how to use the fuzzy neural network recognizing the faults to construct the diagnosis model so that the ability of diagnosing the faults has been increased effectively.

**Key words:** brushless excitation; rectifier fault; fuzzy neural network

克曼窗—哈里斯窗插值算法的测量精度最高,尤其是相位计算准确。实际应用中,选择海宁窗插值算法就能满足测量要求。以下两式为海宁窗插值算法计算复幅值  $A_m$  和相位  $\theta_m$  的计算公式:

$$A_m = \frac{2(1 - \epsilon^2)}{\sin(\epsilon)} e^{j\theta_m} X_m(l)$$

$$\theta_m = \arctan \frac{\text{Im}(A_m)}{\text{Re}(A_m)}$$

其中:  $\epsilon = \frac{2X_m(l) - X_m(l+1)}{X_m(l) + X_m(l+1)}$ ,  $X_m(l)$  和  $X_m(l+1)$

1)是相邻的两个峰值点。

基于该算法的计算结果表明可以有效地提高测量精度,减少泄漏,抑制谐波之间或杂波及噪声的干扰,从而可以比较准确地测量到各次谐波电压和电流的幅值及相位,并计算得到谐波功率、谐波功率流向和谐波阻抗。

文献[5]提出了一种自适应采样算法以减少频谱泄漏现象。该算法主要是根据当前信号频率实时调整采样频率,从而确定下一时刻信号的采样时间。该算法是借助信号的谐波分析来实现的,与固定采样率算法相比,基本不需要增加计算量。仿真实验表明,信号的实际频率与额定频率的偏差大小对算法克服泄漏的影响很小,实时性较好,精度更高。

文献[6]利用数字式锁相器(DPLL)实现信号频率和采样频率同步来减小频谱泄漏现象。图1为频率同步数字锁相装置原理框图。图中数字式相位比较器把取自系统的电压信号的相位和锁相环输出的同步反馈信号进行相位比较。当失步时,数字式相位比较器输出与二者相位差和频率差有关的电压,经滤波后控制并改变压控振荡器的频率,直到输入频率和反馈信号频率同步为止。一旦锁定,便将跟踪输入信号频率变化,保持二者的频率同步,输出的同步信号去控制对信号的采样和加窗函数。这种方法实时性较好。

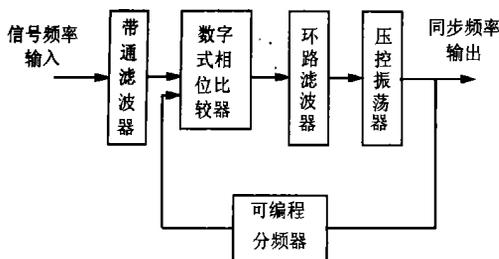


图1 频率同步数字锁相装置框图

Fig. 1 Sketch for digital frequency synchronization phase-locking device

### 3 基于瞬时无功功率理论的测量方法

目前,日本学者 H. Akagi 提出的瞬时无功功率理论为国内外许多学者所使用<sup>[7]</sup>。此理论是基于三相三线制电路的。设三相电路各相电压和电流的瞬时值为  $e_a, e_b, e_c$  和  $i_a, i_b, i_c$ ,为分析问题方便,把它们变换到  $d-q$  两相正交的坐标系上研究。由下面的变换可得到  $d, q$  两相瞬时电压  $e_a, e_b, e_c$  和瞬时电流  $i_a, i_b, i_c$ :

$$\begin{bmatrix} e \\ e \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

其中:  $C_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$ 。

在  $d-q$  平面上,可以解得三相电路瞬时无功功率  $q$ (瞬时有功功率  $p$ ):

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & e \\ e & -e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix}$$

以三相瞬时无功功率理论为基础,计算  $p, q$  或  $i_p, i_q$  为出发点即可得出三相三线制电路谐波检测的两种方法,分别称之为  $p, q$  运算方式和  $i_p, i_q$  运算方式。当电网电压波形没有畸变时,无论是对称或不对称三相三线制电路,这两种方法都能准确得出检测结果。当电网电压波形畸变时, $p, q$  运算方式检测结果有较大误差。这两种方法的优点是当电网电压对称且无畸变时,各电流分量(基波正序无功分量、不对称分量及高次谐波分量)的测量电路比较简单,并且延时小。检测谐波电流时,因被测量对象电流中谐波构成和采用滤波器的不同,会有不同的延时,但延时最多不超过1个电源周期。对电网中最典型的谐波源——三相整流器,其检测的延时约为1/6周期。可见,该方法具有很好的实时性,缺点是硬件多,花费大,实现起来比较繁琐。

文献[8]将该理论发展到单相电路的谐波检测。其基本构想是:在对称的三相三线制电路中,各相的电压波形相同,相位各相差  $120^\circ$ ;同样各相的电流波形也是相同的,相位各相差  $120^\circ$ 。若能根据单相电路的电压、电流构造一个类似的三相系统(或直接构造一个等效的两相系统),即可使用三相电路瞬时无功功率理论。在该方法中,所需的新的信号是通过延时得到的,这一不必要的延时对检测方法的动态响应是很不利的。另外,该方法实现起来也比较繁琐。

文献[9]在分析傅立叶瞬时功率定义的基础上,提出了建立在平均功率基础上的瞬时无功和谐波电流检测的理论,并提出了相应的检测电路。这种算法的物理意义明确,实现电路简单,检测精度较高,实时性比较好,适用于对称和不对称电路。通过仿真证明了这种算法的正确性。

#### 4 基于小波变换的测量方法

小波变换这种新型的理论是数学发展史上的重要成果,已广泛应用于信号分析、语音识别与合成、自动控制、图像处理与分析等领域。电网谐波是由各种频率成分合成的、随机的、出现和消失都非常突然的信号,在应用离散傅立叶变换进行处理受到局限的情况下,可充分发挥小波变换的优势,即对谐波采样离散后,利用小波变换对数字信号进行处理,从而实现对谐波的精确测定。

文献[10]对谐波检测中小波变换频域特性进行了分析。傅立叶变换的时频窗的尺度对于观察所有频谱都是不变的,若将局部频域进行精细分析,傅立叶变换无能为力,而小波变换提供了一个自适应的可调的时频窗,其实时性更强,主要问题是要减小因频域分析造成的误差,必须设法构造一个分频严格、能量集中的小波函数,到目前为止,这种理想的小波级数还未出现。

文献[11]介绍了采用小波变换的谐波有效值测量原理,提出了差拍选频与子带滤波相结合的谐波测量新方法,以及同步检波与子带滤波相结合的电压闪变检测及其频谱分析方法。仿真实验结果表明,文中所提出的方法适用于短时间滤波,电压闪变的检测与时频分析。

文献[12]提出了一种基于小波变换的时变谐波检测方法,利用正交小波在  $L^2(R)$  空间线性张成的标准正交小波基和小波函数时频局部性的特点,将谐波时变幅值投影在小波函数和尺度函数张成的子空间上,从而把时变幅值的估计问题转化为常系数估计,利用最小二乘法即可实现时变谐波的检测。同时递推最小二乘法的应用使该方法适用于谐波在线跟踪。

文献[13]通过对含有谐波的电流信号进行正交小波变换,将原序列信号分解成不同频域的子序列信号。同时分析了电流信号的各个尺度的分解结果,并根据多分辨思想,将高尺度的变换值看作不含谐波的基波分量。基于这种算法构成的谐波检测环节,可以对谐波进行实时检测。

#### 5 基于神经网络的测量方法

由于人工神经网络(ANN)具有很强的学习能力,因此把它用于信号识别也很普遍。它的特点是算法基于误差曲面上的梯度下降,权调数量与输入量一致,并保持与误差的负梯度方向一致,故它能保证网络的收敛性。神经网络应用于电力系统谐波检测尚属于起步阶段。主要应用于3个方面:谐波源辨识;谐波检测;谐波预测。对于谐波分析来说,所得的高次谐波取决于输入模式向量权向量的次数,向量越多,得到的谐波次数越多,但计算时间越长。神经网络对基波电流的跟踪在一个周期内就能达到很好的效果,因此能满足实时性要求。

文献[14]分析了信号处理中的自适应噪声对消技术应用于谐波测量的可能性,在深入研究ANN的学习算法对测量效果的影响的基础上,提出了人工神经网络拓扑结构和参数,该系统能同时检测多个谐波参数,可广泛应用于电力系统实时在线测量,也可检测有源滤波器或有源、无源混合滤波器进行谐波动态补偿时的谐波。

文献[15]也利用了信号处理中的自适应噪声对消技术,结合ANN的基本特点,把ANN用于有源电力滤波器(APF)中。文中首先探讨了把自适应噪声对消技术应用于谐波电流检测的可能性,然后用多层前馈ANN进行自适应滤波,组成了一种基于多层前馈网络(MLFNN)的自适应谐波电流检测系统,文中还讨论了自适应谐波电流检测系统的学习算法,并对一典型非正弦电流波形进行了仿真研究。仿真研究结果表明该方法能在线检测非线性负载电流中的谐波电流,当负载发生变化时还可以跟踪检测,具有较好的检测效果,证实了所提出的方法为有源电力滤波器谐波电流的检测提供了一条新的途径。

#### 6 结论

以上方法是目前谐波检测的主要方法,我们可以根据不同的情况选择测量算法。通过以上方法的分析介绍,傅立叶算法是目前谐波测量中最基本的方法,广泛应用于谐波测量仪器当中;以瞬时无功功率理论为基础,可以得出实时检测有源电力滤波器的谐波和无功电流的方法,也可应用于无功补偿等谐波抑制领域;小波分析和人工神经网络是目前谐波测量方法的热门问题,是正在研究的新方法、新理论,它可以提高谐波测量的实时性和精度。随着电网中非线性负荷的增多,谐波污染日益严重。今后

的谐波测量算法应该从简单的函数分析方法向复杂的数值分析和信号处理方向发展,同时这些算法应该是智能化的。传统功率理论体系中,单相电路与三相电路的功率定义往往互相独立,其定义的物理意义也很不明确,因此急需建立一套能将传统功率理论包括在内、物理意义明确的通用功率理论,并将新理论应用于谐波测量中,使谐波测量在实时性和精度方面取得突破。

#### 参考文献:

- [1] 吴竟昌,孙树勤,宋文南,等. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 王兆安,杨君,刘近军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [3] 夏道止,沈赞. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [4] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报,1999,19(3):63-66.
- [5] 马仁政,陈明凯. 减少频谱泄漏的一种自适应采样算法[J]. 电力系统自动化,2002,26(7):55-58.
- [6] Alessandro Ferreero. High accuracy Fourier analysis based on synchronous sampling techniques [J]. IEEE Trans on IM, 1992,41(6):780-785.
- [7] 王兆安,李民,卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的研究[J]. 电工技术学报,1992,7(3):55-59.
- [8] 杨君,王兆安,邱关源. 单相电路谐波及无功电流的一种检测方法[J]. 电工技术学报,1996,11(3):42-46.
- [9] 薛蕙,杨仁刚. 改进的瞬时无功和谐波电流检测理论[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(2):8-11.
- [10] 王建贇,冉启文,纪延超,等. 谐波检测中小波变换频域特性分析[J]. 电力系统自动化,1998,22(7):40-43.
- [11] 周文晖,林丽莉,周兆经. 基于小波变换的谐波检测法[J]. 仪器仪表学报,2001,22(3):5-7.
- [12] 王建贇,冉启文,纪延超,等. 基于小波变换的时变谐波检测[J]. 电力系统自动化,1998,22(8):52-55.
- [13] 杨桦,任震,唐卓尧. 基于小波变换检测谐波的新方法[J]. 电力系统自动化,1997,21(10):39-41.
- [14] 危韧勇,李志勇. 基于人工神经网络的电力系统谐波测量方法[J]. 电网技术,1999,23(12):20-23.
- [15] 王群,周维,吴宁. 一种基于神经网络的自适应谐波电流检测法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),1997,20(5):6-11.

收稿日期: 2002-12-04

#### 作者简介:

金雄飞(1976-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统监控及配网自动化;

乐秀璠(1952-),男,副教授,研究方向为电力系统监控及继电保护。

### A survey on measuring method for harmonic of network

JIN Xiong-fei, LE Xiufan

(Department of Electrical Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Harmonic measurement plays an important part in power system. This paper analyzed and summarized the recent methods of harmonic measurement presented by lots of scholars in and out of our country. The principle, performance and application situation of the method were pointed out, and relative merits of them were compared. Finally some opinions on the developing and study trend of harmonic measurement were also put forward.

**Key words:** harmonic measurement; Fourier Transform method; instantaneous reactive power; wavelet analysis; neural network

(上接第7页)

### Development of a novel UHV transmission line protection system

MA Yong, CHEN De-shu, CHEN Wei

(The Institute of Electric & Electronic Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A novel UHV transmission line protection system based on digital signal processor (DSP) is introduced. It has two DSPs each of which includes primary protection, backup protection and independent switch recloser. In the principles of protection, directional protective relay based on fault component of compensation voltage and double principles ground distance relay are applied. In addition, module design is applied in software programming. All these improved capability of protection. The protection device has compact structure, high reliability, friendly man-machine interface, powerful communicating function and can be used in all kinds of UHV transmission line protection system.

**Key words:** digital signal processor (DSP); directional protective relay based on fault component of compensation voltage; reactance-grounded distance relay;  $I_0$  polarized ground distance relay