

电网谐波检测现状和发展的探讨

夏向宇

(江苏省电力公司无锡供电公司, 无锡市友谊南路 58 号 214101)

摘 要: 为了准确地了解电网中谐波的情况, 解决日益严重的电能质量问题, 分析了国内外谐波测量方法的特点, 结合本地区电网谐波测量的现状, 探讨了各种谐波测量方法的应用前景, 可为电网谐波测量方法的选择提供参考。

关键词: 电网; 谐波; 检测方法; 应用分析

0 引言

电力系统非线性负荷的大量增加, 尤其是电气化铁路的贯通, 使电网中产生了大量高次谐波, 造成电能质量严重恶化, 对各种电气设备、计算机、测量仪器等产生不利影响, 并危及电网安全和经济运行。

电力系统的谐波, 由于受非线性、非平稳性、随机性和复杂性等因素影响, 对谐波进行准确的测量并非易事。电力系统的谐波问题近几十年来在世界范围内得到了十分广泛的关注, 国际电工委员会 (IEC)、国际供电会议 (CIRED)、国际大电网会议 (CIGRE) 以及美国电气和电子工程师学会 (IEEE) 等国际性学术组织, 都相继成立了专门的电力谐波工作组, 并已制定了限制电力系统谐波的相关标准。我国自 1982 年以来对谐波测量的研究从未间断, 测量方案从运用傅氏变换到快速傅立叶变换算法, 从模拟式发展到电子式、数字式、智能化, 其中快速傅立叶变换算法最为突出。

为满足电力系统谐波测量技术发展的需要, 本文就现有国内外谐波测量方法进行分析, 结合本地区电网谐波测量的现状, 探讨了各种谐波测量方法的应用前景, 可为电网谐波测量方法的选择提供参考。

1 现有国内外谐波测量方法

谐波测量伴随着交流电力系统发展的全过程, 诞生了频域理论和时域理论, 形成了多种谐波测量方法, 现就下面几种方法作具体介绍。

1.1 基于模拟滤波器的谐波测量方法

最早的谐波测量是采用模拟滤波器实现的, 图 1 为模拟并行滤波式谐波测量装置框图。由图 1 可见, 输入信号经放大后送入一组并行联结的带通滤波器, 滤波器的中心频率 f_1 、 f_2 、 $f_3 \dots$ 、 f_n 是固

定的, 为工频的整数倍, 且 $f_1 < f_2 < f_3 \dots < f_n$ (其中 n

是谐波的最高次数), 然后送至多路显示器显示被测量中所含谐波成分及其幅值。该测量方法的优点是电路结构简单, 造价低, 输出阻抗低, 品质因素易于控制。缺点是: ①误差大, 实时性差, 电网频率变化时尤其明显; ②滤波器的中心频率对电路元件参数十分敏感, 参数变化时检测效果明显变差, 难以获得理想的幅频和相频特性。由于存在上述较严重的缺陷, 随着对谐波测量要求的提高, 以及新的测量方法的日益成熟, 该方法已不再优先选用。

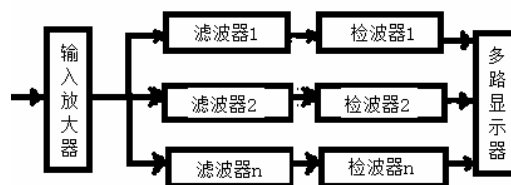


图 1 模拟并行滤波式谐波测量装置

1.2 基于瞬时无功功率的谐波测量方法

1984 年, 日本学者 H.Akagi 等提出瞬时无功功率理论, 在此基础上提出两种谐波电流的测量方法: p-q 法和 ip-iq 法。这两种方法都能准确地测量对称的三相三线制电路的谐波值。ip-iq 法适用范围广, 不仅在电网电压畸变时适用, 在电网电压不对称时也同样有效。而 p-q 法在测量电网电压畸变的谐波时存在较大误差。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含量)的测量电路比较简单,并且延时小,具有很好的延时性;其缺点是硬件多,花费大。而且由于瞬时无功功率谐波测量理论基于三相三线制电路,单相电路的谐波测量较麻烦。

1.3 基于傅里叶变换的谐波测量方法

基于傅里叶变换的谐波测量是当今应用最多,也是最广泛的一种方法。它由离散傅里叶变换过渡到快速傅里叶变换的基本原理构成。使用此方法测量谐波,准确度较高,功能较多,使用方便;其缺点是需要一定时间的采样值,且需进行变换,计算量大,计算时间长,从而使得测量时间较长,测量结果实时性较差。另外在采样过程中,当采样频率与信号频率不一致时,会产生频谱泄漏效应和栅栏效应,使测量的信号参数不准确,尤其是相位的误差很大,无法满足测量准确度的要求。因此必须对算法进行改进,以减少频谱泄漏。目前,减少频谱泄漏的方法主要有三种:

1) 数字式锁相器法。利用数字式锁相器(DLPP)使信号频率和采样频率同步。图 2 为频率同步数字锁相装置框图。图中数字式相位比较器把取自系统的电压信号与锁相环输出的同步反馈信号进行相位比较,当异步时,数字式相位比较器输出与两者的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,直到输出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,保持两者的频率同步,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,但需增加硬件,花费较大。

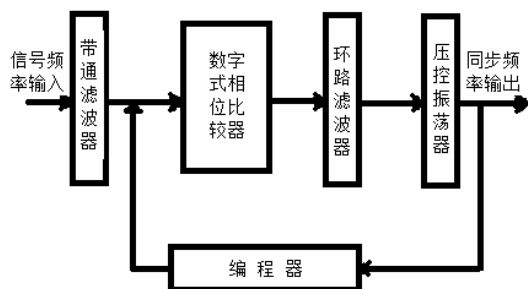


图 2 频率同步数字锁相框图

2) 修正理想采样频率法。这种方法主要思想是当采样周期与采样点数的乘积等于信号周期的整数倍时,该算法得到的离散序列就是信号的采样序列。反之,修正算法将自动调整采样得到的离散序列,使其最大程度地逼近理想序列。由于修正后的序列

只需进行加法和乘法运算,因此计算量不大,也不需添加任何硬件,实时性较好,适合在线测量。但根据相关资料可知,该方法只能减少 50% 的泄漏,计算所得的结果还不够准确。

3) 加窗插值算法。加窗插值法是在时域上对采样数据进行加窗处理,经傅里叶变换后再对结果进行插值运算以得到准确的结果。但用傅里叶变换进行电力谐波分析时很难做到同步采样和整数周期截断,由此造成频谱泄漏和栅栏效应。采用性能优良的窗函数可减少频谱泄漏引起的误差,对计算结果进行插值修正可减少栅栏效应引起的误差。

1.4 基于小波变换的谐波测量方法

小波变换是针对傅里叶分析方法在分析非稳态信号方面的局限性形成和发展起来的一种十分有效的时频分析工具。当前小波变换在谐波测量中的应用主要有:①利用小波变换和最小二乘法相结合来代替基于 Kalman 滤波的时变谐波跟踪方法,它将各次谐波的时变幅值投影到正交小波基构成的子空间,然后利用最小二乘法,估计其小波系数,将时变谐波的幅值估计问题转换成常系数估计问题,从而具有较快的跟踪速度;②利用小波变换的小波包具有将频率空间进一步细分的特性以及电力系统中产生的高次谐波投影到不同的尺度上会明显地表现出高频、奇异高次谐波信号的特性进行谐波分析;③通过对含有谐波信号进行正交小波分解,分析原信号的各个尺度的分解结果,达到检测各种谐波分量的目的,从而具有快速的跟踪速度;④将小波变换和神经网络结合起来对谐波进行分析,并设计和开发基于小波网络的谐波测试仪。

小波变换克服了傅里叶变换在频域完全局部化而在时域完全无局部性的缺点,对波动谐波、快速变化谐波的检测有很大的优越性。但小波变换并不能完全取代傅里叶变换,因为小波变换在稳态谐波测量方面并不具备理论优势,且小波变换的理论和应用研究时间相对较短,小波变换应用在谐波测量方面尚处于初始阶段,还存在着许多不完善的地方。因此小波变换和傅里叶变换存在互补的优势。

1.5 基于神经网络的谐波测量方法

根据谐波的非线性特性,将神经网络应用于谐波测量中,将会有很好的应用前景。近年来,国内外应用神经网络进行谐波测量的相关研究迅速增加,主要研究有以下 3 个方面:谐波源的辨识;电

力系统谐波预测；谐波测量。神经网络应用于谐波测量，是利用神经网络对任意连续函数的逼近能力和学习能力，通过构造特殊的多层前馈神经网络建立相应的谐波测量电路，主要涉及网络构建、样本的确定和算法的选择。

基于神经网络的谐波测量方法显现出的优点有：①检测准确度高，各次谐波测量准确度不低于傅立叶变换和小波变换，能取得令人满意的结果；②对数据流长度的敏感性低于傅立叶变换和小波变换；③实时性好，可以同时实时检测任意整数次谐波；④抗干扰性好，在谐波测量中可以应用一些随机模型的信号处理方法，对信号源中的非有效成份（如直流衰减分量）当作噪声处理，克服噪声等非有效成份的影响。但是，神经网络在谐波测量中的实际应用还有很多问题，例如：没有规范的神经网络构造方法、需要大量的训练样本、如何确定需要的样本数、没有规范的方法，同时神经网络的准确度对样本有很大的依赖性。

1.6 基于虚拟磁势法的谐波测量方法

虚拟磁势法是近几年提出的最新的一种谐波计算方法。其基本思想是：把三相电压分别加到它的三个在空间各相差 120° 的具有相同匝数的绕组上，这样产生的各相磁动势在空间合成一个总的合成磁势，用对等方法得到一个三相合成电流矢量和各相电流分量的关系，利用各相电流的瞬时值就可求出三相合成电流的瞬时值。将三相合成电流经 FFT 运算后就可求出三相合成电流的各次谐波量，然后经过分解就得到了各相电流各次谐波量。同理，各相电压的谐波量也可以用该方法求得。虚拟磁势法将三相问题转化成单相问题，大大简化了计算量，且谐波量的计算准确度高。但基于虚拟磁势法存在以下缺陷：①由于三相电压的零序分量大小相等、方向彼此相差 120° ，导致合成磁势的零序分量为零，则零序谐波无法直接求出，而必须通过补充的零序谐波计算来解决；②由于虚拟磁势法的基本原理是建立在三相平衡的基础上，因此当三相不平衡时将产生很大的计算误差。

1.7 基于 Kalman 滤波、遗传算法、模拟退火算法的谐波测量方法

这 3 中方法都是谐波测量估计的智能优化算法，多数情况下和 FFT、DFT、STFT（短时傅立叶变换）、小波变换以及误差理论相结合，首先利用

FFT、DFT、STFT、小波变换对谐波电流进行变换，然后利用各自的优化算法，将其中的未知谐波成份与已知谐波分量进行优化比较，使其均方误差最小，从而达到检测识别未知频率成份的目的。3 中方法均有较强的抗噪声能力，但多数用于电力系统谐波的预测估计以及谐波潮流的波动传播估计中，较难实时、准确地检测谐波。

2 实际应用的分析

2.1 电网谐波测量现状

目前，电网主要是通过电能质量监测仪来检测线路中的谐波畸变率以及各次谐波含量。谐波对电能计量会产生影响，尤其是谐波源用户将其吸收的基波功率转化为谐波功率馈送给电网时，一方面给电网造成严重污染，而另一方面由于目前的安装式电能表计量的总电能是基波有功电能和谐波有功电能的代数和，这就使得谐波源用户不仅没有因污染电网而受到应有的惩罚，相反却可以少付电费获得好处。但对那些非污染源的用户来讲，他们不仅被迫接受由谐波源送来的、可能给他们造成严重后果的谐波电能，而且由于在他们的电能表上计算的总电能为输入有功电能加上输入的谐波电能，因此反而增加了电费支出，这种不合理现象经常引起供电企业和用电企业之间的争执。因此，研究并选择能准确测量、且易于实现的谐波测量方法是开展谐波电能计量技术研究的基础，也符合电网发展的需要。

2.2 各种谐波测量方法的应用分析

虽然上述各谐波测量方法在某个时期某个领域都有其理论和应用上的优势，但从谐波测量准确度、测量实时性和实现等角度看，并不是每一种方法都具有应用价值。

①基于模拟滤波器和瞬时无功功率的谐波测量方法因误差大、实时性差、测量功能不齐全而不再用于实际测量中。近年有学者提出基于广义 d-q 旋转坐标变换的各次谐波检测方法，该方法仅适合对称的三相三线电路负载电流检测，且尚在理论探讨上。

②基于神经网络和小波变换的谐波测量方法，在谐波测量的准确度、测量功能性方面取得了一些理论性成就，但从谐波电能计量等实际应用方面看，其研究和应用的时间还较短，还有许多不完善的地方，且还缺乏相应的硬件支撑技术。

③基于虚拟磁势法、Kalman 滤波、遗传算法、模拟退火算法的谐波测量方法都是谐波测量估计的智能优化算法,多数情况下和 FFT、DFT、STFT(短时傅立叶变换)、小波变换以及误差理论相结合,这些研究都仅在理论阶段,还未应用于现场检测中。

④综合谐波测量准确度、测量实时性和实际应用等各方面的因素,目前只有基于傅里叶变换的谐波测量方法在电网测试中得到了很好应用。该方法在实际应用中表现的优越性有:a)易于实现,快速傅立叶变换理论的出现和 DSP 技术的发展使该方法易于嵌入系统中实现;b)功能较多,该方法可以分析出信号的各次谐波含量以及谐波功率的潮流方向,有利于开发谐波电能表;c)准确度较高,加窗、插值等数学处理方法的应用有效地减少了傅立叶变换固有的频谱泄露效应和栅栏效应,提高了谐波分析的准确度。

4 结束语

综合以上分析,可以得出如下结论:

(1)基于傅立叶变换的谐波测量方法是目前广泛应用于电力系统谐波分析的主要方法,也是未来谐波电能计量的主流方法,且在很长一段时期内具有巨大的应用价值。

(2)研究能在非同步采样条件下实现非线性电路动态谐波分析与谐波电能计量的新方法是电力系统谐波测量技术发展的新要求。

(3)谐波测量、谐波分析、谐波治理相互结合,测量与控制集成化、一体化、智能化以及在线谐波测量已成为谐波研究新趋势。

根据不同情况选择不同测量方法,为电网谐波分析提供详细、实时、准确的数据,是改善电能质量、谐波电能计量的关键所在。

参考文献:

- [1] GB/T14549-1993,电能质量公用电网谐波[S].
- [2] 丁晓群,孙军,袁宇波,等.基于 BP 网络的故障诊断方法的改进[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 62-62, 68.
- [3] 吕润余.电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社,1998.
- [4] 周志华,尹旭日,陈兆乾,等.神经网络在电力变压器运行状态检测中的应用[J]. 自动化学报, 2002,28(2):301-305.
- [5] 粟时平,郑小平,金维宇.电力系统谐波检测方法及其实现

技术的发展[J]. 电气开关, 2004(1):33-38.

- [6] 周俊,王小明,祁才君.基于 Blackman 窗函数的插值 FFT 在电网谐波信号分析中的应用[J]. 浙江大学学报:理学版, 2006,33(6):650-653.
- [7] 王建斌,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(08).
- [8] 危初勇,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.
- [9] 崔学深,郭志忠,刘壮志. 电力系统动态频率测量的“虚拟电枢磁势”法[J].中国电力, 2000(8).

作者简介:

夏向宇(1963-)女,西安交通大学电气工程系电测专业,工程师,自 1990 年起一直从事电测仪表及电能表的检定、修理和检定装置的测试、维护管理及现场用户谐波的测试工作。