

电力系统谐波检测综述

马晓蕾, 尹忠东, 周丽霞, 朱燕舞

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控室, 北京市 102206)

摘要:谐波被认为是电网的一大公害,对电力系统谐波问题的研究已经引起了人们的关注。谐波问题的研究包括很多研究分支,如:畸变波形分析、各谐波源分析、谐波限制标准、谐波抑制以及谐波测量等。主要针对谐波测量展开,总结了各个谐波检测法,并加以分析比较。

关键词:谐波;电力系统;检测

Abstract: Harmonics are considered one of the serious harms for power system. The research of harmonics has obtained high attention among people. The researches of harmonics have many branches, such as distorted harmonic analysis, harmonic suppression and harmonic detection etc. Aiming at harmonic detection, the different detection methods of power system harmonics are summarized and compared.

Key words: harmonics; power system; detection.

中图分类号:TM714 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)02-0053-04

近年来,随着电力电子装置的日益广泛,电能质量得到了有效的提高。但是,配电网中诸如换流器、变频调速、电弧炉、电气化铁路、家用电子电器等各种设备不断增加,这些负荷的用电特性(非线性、冲击性和不对称性)使电力系统中电压和电流的波形发生较严重的畸变,形成严重的谐波问题。

谐波被认为是电网的一大公害,对电力系统谐波问题的研究已经引起了人们的关注。谐波问题的研究包括很多研究分支,如:畸变波形分析、各谐波源分析、谐波限制标准、谐波抑制以及谐波测量等。主要针对谐波测量展开。

谐波检测伴随着交流电力系统得发展,产生了频域理论和时域理论,形成了多种检测方法。主要有:模拟滤波器、基于 Fryze 传统功率定义的谐波检测法、基于傅立叶变换的谐波检测法、基于瞬时无功功率理论的谐波检测法、基于神经网络的谐波检测法、基于小波分析的谐波检测法。

1 模拟滤波器

早期的谐波检测方法都是基于频域理论,即采用模拟滤波原理。模拟滤波器有两种,一是通过滤波器滤除基波电流分量,得到谐波电流分量。二是带通滤波器得出基波分量,再与被检测电流相减后得到谐波电流分量,其原理和电路结构简单,造价低,能滤除一些固有频率的谐波。但这种检测方法有其自身

的缺点:误差大,实时性差,电网频率变化时尤其明显;对电路元件参数十分敏感,参数变化时检测效果明显变差,获得理想的幅频和相频特性很困难。故随着电力系统谐波检测要求的提高以及新的谐波检测方法日益成熟,这种方法已不再优先选用。

2 基于 Fryze 传统功率定义谐波检测法

Fryze 功率理论,中心思想是把电流分为有功电流和无功电流,其中有功电流波形与电压相似,仅相差一个比例系数。

在三相 Fryze 时域功率理论中,各相电流可以分为有功分量和无功分量,三相电压和电流分别为 e_a 、 e_b 、 e_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 以 a 相为例(b、c 相类同),a 相瞬时电流可以分解为 i_{ap} 、 i_{aq} :

$$i_{ap}(t) = Gge_a(t)$$

$$i_{aq}(t) = i_a(t) - i_{ap}(t)$$

其中 $G = \frac{P}{\sum_{k=a,b,c} e_k^2}$, P 为三相系统得平均有功功率,也就是三相系统的瞬时功率中 P 的直流分量,等于 P 在一个周期内的积分:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) d\omega \end{aligned}$$

三相有功电流可以表示为:

$$i_{ap} = \frac{e_a}{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2} P$$

$$i_{bp} = \frac{e_b}{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2} P$$

$$i_{cp} = \frac{e_c}{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2} P$$

当电压无畸变时,上面两式在空间矢量上的物理意义就是有功电流矢量 $(i_{ap}, i_{bp}, i_{cp})^T$ 与电压矢量 $(e_a, e_b, e_c)^T$ 完全在同一条直线上,而无功电流矢量与电压矢量相互正交,其标量积的平均值为零。

当电网电压没有畸变时,假设三相电压可以表示为:

$$e_a = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$e_b = U_1 \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1)$$

$$e_c = U_1 \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1)$$

此时, $\sum_{k=a,b,c} e_k^2 = \frac{3}{2} U_1^2$ 不随时间而变化,因此 G 也是常数,得到的有功电流与电压波形相似,仅相差一个比例常数 G ;当电压畸变时,由于 $\sum_{k=a,b,c} e_k^2$ 随时间变化, G 不是常数,得到的有功电流与电压波形不相似。因此, Fryze 功率理论在电压无畸变时可以准确检测出三相系统无功电流,而电压有畸变时则不能准确检测出系统无功电流。然而当电压畸变程度不大时, $\sum_{k=a,b,c} e_k^2$ 随时间的波动很小,同样 G 的波动也很小,得到的基波有功电流与电压波形基本上相似,可以近似地检测出系统无功电流^[1]。

基于 Fryze 传统功率定义的谐波检测法其原理是将负荷电流分解为与电压波形一致的分量,将其余分量作为广义无功电流(包括谐波电流)。它的缺点是:因为 Fryze 功率定义是建立在平均功率基础上的,所以要求得瞬时有功电流需要进行一个周期的积分,再加其他运算电路,要有几个周期延时。因此,用这种方法求得的“瞬时有功电流”实际是几个周期前的电流值。

3 基于瞬时无功理论的检测方法

瞬时无功理论是1983年日本学者赤木泰文提出的理论,即 $p-q$ 理论。随着理论和应用得发展,它解决了谐波和无功功率的瞬时检测和不用储能元件就能实现抑制谐波和无功补偿等问题。

根据该理论,可以得到瞬时有功功率 p 和瞬时

无功功率 q , p 和 q 中都含有直流分量和交流分量。由此可得被检测电流的基波分量,将基波分量与总电流相减即得相应的谐波电流。因为该方法忽略了零序分量,且对于不对称系统,瞬时无功的平均分量不等于三相的平均无功。所以,该方法只适用于三相电压正弦对称情况下的三相电路谐波和基波无功电流的检测^[2]。

4 基于傅立叶变换的谐波检测法

1822年法国数学家傅里叶(J. Fourier)首次提出并证明了将周期函数展开为正弦级数的原理,从而奠定了傅里叶级数(Fourier Progression, FP)与傅里叶变换(Fourier Transformation, FT)的理论基础。二者后被统称为傅里叶分析(Fourier Analysis, FA)。

它由离散傅立叶变换过渡到快速傅立叶变换的基本原理构成,这种方法根据采集到的1个周期的电流值或电压值进行计算,得到该电流所包含的谐波次数以及各次谐波的幅值和相位系数,将拟抵消的谐波分量通过傅里叶变换器得出所需的误差信号,再将该误差进行 Fourier 反变换,即可得补偿信号^[3]。

使用此方法测量谐波,精度较高,功能较多,使用方便。其缺点是需要一定时间的电流值,且需进行二次变换,计算量大,计算时间长,从而使得检测时间较长,检测结果实时性较差。而且在采样过程中,当信号频率和采样频率不一致时,使用该方法会产生频谱泄漏效应和栅栏效应,使计算出的信号参数(即频率、幅值和相位)不准确,尤其是相位的误差很大,无法满足测量精度的要求,因此必须对算法进行改进。

目前,改进的傅立叶变换在减少频谱泄漏上有3种方法:①利用加窗插值算法对快速傅立叶算法进行修正的方法。该方法可减少泄漏,有效地抑制谐波之间的干扰和杂波及噪声的干扰,从而可以精确测量到各次谐波电压和电流的幅值及相位。②修正理想采样频率法。这种方法的主要思想是对每个采样点进行修正,得到理想采样频率下的采样值。该方法计算量不大,并不需要添加任何硬件,实时性比上一种方法好,适合在线测量,但只能减少50%的泄漏。③利用数字式锁相器(DPLI)使信号频率和采样频率同步。图1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的相位和频率与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^{[4][5][6]}。

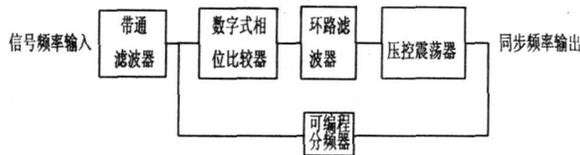


图 1 频率同步数字锁相装置框图

目前, 在电力系统稳态谐波检测中大多数采用快速傅立叶变换及其改进算法, 而对于波动谐波或快速变化的谐波, 则需另寻他法。

5 基于神经网络的谐波检测法

神经网络 (Neural Network, NN) 由心理学家 w·S·McCulloch 和数学家 W·Pitts 于 1943 年提出。1958 年 Rosenblatt 提出感知机, 第一次把 NN 的研究付诸工程实践, 此后, NN 得到迅速发展。

神经网络应用于谐波检测, 主要涉及网络构建、样本的确定和算法的选择。采用神经网络原理的谐波测量模型主要有: 基于自适应线性神经源的谐波测量方法; 基于多层 BP 网络的谐波测量方法和基于径向基函数网络的谐波测量方法等几种。用人工神经网络实现谐波与无功电流检测不仅对周期性变化的电流具有很好的跟踪性能, 而且对各种非周期变化的电流也能进行快速跟踪, 对高频随机干扰有良好的识别能力。谐波的 NN 检测方法显现出的优点有: 计算量小; 检测精度高, 各次谐波检测精度不低于 FT 和 WT, 能取得令人满意的结果; 对数据流长度的敏感性低于 FT 和 WT; 实时性好, 可以同时实时检测任意整数次谐波; 抗干扰性好, 在谐波检测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, NN 用于工程实际还有很多问题, 例如: 没有规范的 NN 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方法, NN 的精度

对样本有很大的依赖性, 等等^[7]。

6 基于小波分析的谐波检测法

小波变换 (Wavelet Transformation) 是针对傅立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。小波分析是一个时间和频率的局域变换, 因而能有效地从信号中提取信息, 通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度细化分析 (Multiscale Analysis)。小波分析能算出某一特定时间的频率分布并将各种不同频率组成的频谱信号分解为不同频率的信号块, 因而通过小波变换, 可以较准确地求出基波电流, 进而求得谐波。

6.1 基于小波包的算法

可以用于大型变压器励磁涌流波形的识别, 本方法引入短数据窗对采样数据进行分析, 具有良好的实时性。通过把小波变换应用于变压器差动保护的间断角测量, 实现了小波变换局部极大值测量间断角。计算机仿真表明, 本方法算法简单, 抗干扰能力强, 测量精度高, 可使间距误差达到 0.003 1 s, 间断角误差为 7.5°, 是比较小的。可降低间断角微机保护的成本, 有助于加速变压器差动保护微机化的进程。

6.2 正交小波变换分析

用“周期小波变换”精确地分解出基波及谐波信号, 然后在原始信号中减掉周期信号后, 用平滑延拓进行小波分解。在小波包分解过程中采用代价函数决定最优分解二叉树。一旦发现某个节点的 $\cos t = 0$, 就不再对此节点进一步分解。设 ζ 为阈值, 代价函数定义如下:

$$\cos t = \begin{cases} 0 & \text{power} \leq \zeta \\ \text{power} & \text{power} > \zeta \end{cases}$$

$$\text{power} = \sqrt{\sum c^2(t)}$$

用“周期小波变换”在处理高次谐波暂态过程时在边缘处有混频现象。由于电力信号的高次谐波所占比例较小, 实际计算结果能够满足工程需要。本算法能够广泛应用于大型钢铁企业及电力机车供电系统的谐波分析。

6.3 离散和连续小波包结合的方法

使用离散小波包变换的滤波器组将波形频谱分解成子波段, 然后用连续小波变换估计非零子波段的谐波内容, 可以同时检测识别所有谐波中包括整次、非整次和分谐波。该方法能精确量化谐波的频

率、幅值和相位。在澳洲西部系统中证明了该方法对波形合成和波形测量都是非常有效的。

6.4 基于小波变换的用 KALMAN 滤波

利用本方法建立一个在线跟踪检测电源系统谐波的新模型,以小波和多尺度分析的紧密联系来表示小波比例函数之和的谐波幅值和相位角。这个模型可通过求解小波比例函数的系数直接估计出谐波幅值和相位角。这个模型是结合了 KALMAN 滤波技术来开展在线谐波跟踪方法的。仿真表明本模型比传统的模型有更好的跟踪能力。

6.5 快速傅里叶变换和连续小波变换

可以同时谐波、间谐波和信号闪变进行测量。对电源电路中容量的非线性装置的间歇运转造成电压和电流波形的谐波畸变和闪变有很好的检测效果。通过合成信号的仿真验证了这个算法的性能,在电弧炉直流电路的测量试验记录中验证了其可行性。试验的图解分析表明此算法运算时间较短,精确度也较好。

6.6 分离谐波的算法

本方法结合了傅里叶变换和连续小波变换的特点,实例验证表明该算法能够把频率相近的整数次和非整数次谐波分离,实现较理想的检测,从而提高了谐波分析、检测的精度。

6.7 基于小波变换的时变谐波检测方法

利用正交小波在 $L(R)$ 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到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。此方法可以准确检测时变谐波并且具有较快的跟踪速度^[8]。

7 结束语

对谐波检测有多种方法,需要根据不同情况合理

选择谐波检测方法,为谐波分析提供详细、准确、实时的数据和信号,是提高检测效果、改善电能质量的重要一步。随着各种先进技术和理论的应用,特别是计算机在谐波检测中的具体使用,谐波检测的实时性和精度要求一旦解决,相信电网谐波检测技术将逐渐得到发展和完善。

参考文献

- [1] 陈艳慧,黄海鲲.基于 Fryze 功率理论的谐波检测算法与 $p-q$ 算法的一致性[J]. 山东电力技术, 2006, 3: 15-16, 24.
- [2] 李芬华,胡建军.一种单相电路谐波以及基波电流检测方法[J]. 电测与仪表, 2005, (8): 18-19.
- [3] 涂春鸣,罗安.电网谐波分析与治理一体化系统的研究[J]. 计算机测量与控制. 2003.12(7): 632-634.
- [4] Grandke T. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals[J]. IEEE Trans on IM, 1983, 32: 350-355.
- [5] Xi Jiangtao. A new algorithm for improving the accuracy of periodic signal analysis[J]. IEEE Trans on IM, 1996, 8: 827-830.
- [6] Ferrero A. High accuracy Fourier analysis based on synchro sampling techniques[J]. IEEE Trans on IM, 1992, 41(6): 780-785.
- [7] 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.
- [8] 李红,杨善水.电力系统谐波检测的现状与发展[J]. 现代电子技术. 2004(9): 81-84.

作者简介:

马晓蕾(1982~),女,硕士研究生,研究方向为磁阀式可控电抗器、FACTS 技术。

尹忠东(1968~),男,博士后,副教授,从事 FACTS 技术、分布式发电及电能质量方面的研究。

周丽霞(1982~),女,博士研究生,研究方向为电能质量。

朱燕舞(1983~),男,硕士研究生,研究方向为 FACTS 技术。

收稿日期:2007-10-10)

简 讯

小波分析的电网谐波监测系统研制

从电监会颁布的《居民供用电合同》的背景和供电企业需要对电网谐波进行治理的角度出发,针对电网中缺少谐波监测系统的现状,提出了建设电网谐波监测网络的问题。主要阐述了电网谐波监测网络的组成,设计了基于 USB 接口高速传输的采集测量硬件系统;其次在软件设计时作者提出了信号分析方法,特别是在对电网谐波进行分析时采用了小波分析算法,另外根据实际中需要大容量存储数据的问题提出了解决的策略,从而最终完成了谐波监测装置的研制和谐波监测网络的组建。