

一种克服累积误差的谐波递推算法

陈 赟¹, 陈光大²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 讨论了一种基于滑动窗口的电量测量算法, 并在此基础上推导了具有最小计算量的递推算法, 最后得到了一种可克服累积误差的快速算法。该算法基本是建立在离散傅里叶变换之上的一种递推算法, 保留了频域法的优点的同时又克服了传统频域法需要大量计算的缺点。该算法较大地提高了计算效率和算法实时性, 可被应用于实时控制、无功功率和谐波补偿、以及功率和能量实时计算等诸多领域。

关键词: 谐波; 电量; 测量; 瞬时值; 误差; 算法

A recurrence algorithm of harmonics calculation for avoiding the cumulative errors

CHEN Yun¹, CHEN Guang-da²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper discusses an algorithm based on a sliding window, and it also proposes two algorithms that are the recursive algorithm with the least calculations and the fast algorithm which can avoid the cumulative errors. It is a recursive algorithm based on Discrete Fourier Transform (DFT), which keeps the virtue of frequency-domain and overcomes the disadvantages of traditional frequency-domain that needs lots of calculations. This algorithm can enhance the computational efficiency and time response greatly. Therefore, it can be used for the real-time control, compensations of reactive power and harmonics, real-time calculation of power and energy, etc.

Key words: harmonics; electrical quantities; measurement; instantaneous value; error; algorithm

中图分类号: TM933 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0063-03

0 引言

在谐波干扰存在的条件下, 对电量进行测量, 不外乎时域法和频域法两类方法^[1]。大多数时域法通常是针对某种特定的应用场合而设计的, 存在着算法简单, 实时性好等特点。但它仅能提供十分有限的电路特性和有用信息, 因而其应用受到了很大的限制。基于傅里叶变换的频域法, 当被测信号可以被认为是一个周期信号, 或可以被近似认为是一个周期信号时, 通过截取适当的时间窗口, 并进行周期延拓, 可以给出较之时域法对电路特性和信息更为精确、有用的描述, 其结果可以广泛用于很多应用场合。但它往往需要大量的计算, 且其有用结果往往要滞后被测信号至少一个周期。对于很多实时性要求较高的场合, 显然存在一些问题^[2-6]。

本文将讨论一种对电量的新型测量算法。首先, 此算法是基于频域法的, 其基本思路是建立在离散傅里叶变换之上, 它保留了频域法的优点。其次,

它是一种递推算法(或滚动算法), 克服了传统频域法需要大量计算的缺点。此外, 对于每一采样时刻的采样数据, 均给出一个可用的计算结果。

1 基本算法^[1,7]

对于含有谐波的被测信号, 其各次谐波分量可定义为

$$\dot{I}_h = I_h e^{j\alpha_h}, \quad \dot{U}_h = U_h e^{j\beta_h} \quad (1)$$

这里, 下标 h 表示第 h 次谐波分量。它不但能表达被测量信号的幅值信息, 同时也提供了它们的相位信息。这实际上就是我们通常所说的电流或电压的复有效值。一般地, 我们可以定义任意被测信号的复有效值为

$$\dot{X}_h = X_h e^{j\zeta_h} = \text{Re}\{\dot{X}_h\} + j\text{Im}\{\dot{X}_h\} \quad (2)$$

为得到所需的复有效值, 传统的基于频域法的方法是对被测信号在与该信号周期相等的时间窗口中进行等间隔采样, 然后, 用离散傅氏变换法(DFT), 根据所得采样值按式(3)计算各次谐波的复有效值。

$$\dot{X}_h = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j\frac{2\pi}{N}hk} \quad (3)$$

这里, N 为一个时间窗口中的采样次数, x_k ($0 \leq k \leq N-1$) 为被测信号在采样点的采样值, h 表示谐波次数。对于一个稳定的、周期的信号而言, 直接用式(3)计算, 除计算量较大外, 并没有任何问题。但当被测信号受到干扰或发生变化时, 要检测到这种干扰或变化, 至少需要一个稳定的时间窗口。针对上述问题, 我们可以假定一个随时间向前滑动的窗口, 仍使用式(3)对最近的 N 个采样数据, 即 $x_{k-N+1}, x_{k-N+2}, \dots, x_{k-1}, x_k$ 进行计算。这样, 得到结果的时间间隔将由原来的一个被测信号周期缩短为一个采样周期。当然, 随之而来的问题是计算量的大大增加。因为, 原来一个基波周期所需完成的计算量现在必须在一个采样周期内完成。例如, 要得到基波分量的实部和虚部共需 $2(N+1)$ 次乘法法和 $2(N-1)$ 次加法运算。

2 递推算法^[7~9]

为减少计算量, 下面我们来讨论式(3)的递推算法。首先, 将式(3)改写为

$$\dot{\tilde{X}}_{h,k} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=k-N+1}^k x_n e^{-j(2\pi/N)nh} \quad (4)$$

其中: $\dot{\tilde{X}}_{h,k}$ 表示在 k 时刻, 第 h 次谐波的复有效值, 我们有

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_{h,k} &= \frac{\sqrt{2}}{N} [x_{k-N+1} e^{-j(2\pi/N)(k-N+1)h} + x_{k-N+2} e^{-j(2\pi/N)(k-N+2)h} + \dots + \\ & x_{k-1} e^{-j(2\pi/N)(k-1)h} + x_k e^{-j(2\pi/N)kh}] = \\ & \frac{\sqrt{2}}{N} [x_{k-N} e^{-j(2\pi/N)(k-N)h} - x_{k-N} e^{-j(2\pi/N)(k-N)h} + x_{k-N+1} e^{-j(2\pi/N)(k-N+1)h} + \\ & x_{k-N+2} e^{-j(2\pi/N)(k-N+2)h} + \dots + x_{k-1} e^{-j(2\pi/N)(k-1)h} + x_k e^{-j(2\pi/N)kh}] \end{aligned}$$

注意到

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_{h,k-1} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=k-N}^{k-1} x_n e^{-j(2\pi/N)nh}, \\ e^{-j(2\pi/N)(k-N)h} &= e^{-j(2\pi/N)kh} e^{-j(2\pi/N)(-N)h} = e^{-j(2\pi/N)kh} \end{aligned}$$

这里, $h = 1, 2, 3, \dots$, 则

$$\dot{\tilde{X}}_{h,k} = \dot{\tilde{X}}_{h,k-1} + \frac{\sqrt{2}}{N} (x_k - x_{k-N}) e^{-j(2\pi/N)kh} \quad (5)$$

这就是我们要得到的在离散时间点 k 时刻第 h 次谐波分量的递推公式。可见, 要得到现时刻的第 h 次谐波分量, 只需用 $k-1$ 时该次谐波分量的计算结果及本次采样值和第 $k-N$ 次采样值通过极为简单

的计算即可。

在实际测量算法中, 递推初值可采取常规的 DFT 或 FFT 方法测试得到, 也可设置为零, 在被测信号稳定的情况下, 经 N 次递推, 结果即可使用。显然, 在这种情况下, 要计算出基波分量的实部和虚部仅需 1 次乘法法和 2 次加(减)法运算, 且计算量与每一信号周期的采样点数 N 无关。

3 快速算法^[7, 10~12]

递推算法虽然具有最小的计算工作量, 然而, 由于算式中包括有累加运算, 在定点运算中, 如果字长较短, 或计算过程中不适当的截断, 均可引起结果大幅度的偏离。为了解决该问题, 我们来讨论一种计算量处于基本算法和递推算法之间的快速算法。

仍从式(4)出发,

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_{h,k} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=k-N+1}^k x_n e^{-j(2\pi/N)nh} = \text{Re}\{\dot{\tilde{X}}_{hk}\} + j\text{Im}\{\dot{\tilde{X}}_{hk}\} = \\ & \frac{\sqrt{2}}{N} [\sum_{n=k-N+1}^k x_n \cos(\frac{2\pi}{N}nh) - j \sum_{n=k-N+1}^k x_n \sin(\frac{2\pi}{N}nh)] \end{aligned} \quad (6)$$

令 $a_{h,n} = x_n \cos(\frac{2\pi}{N}nh), b_{h,n} = -x_n \sin(\frac{2\pi}{N}nh)$, 式(6)可改写为

$$\dot{\tilde{X}}_{h,k} = \frac{\sqrt{2}}{N} (\sum_{n=k-N+1}^k a_{h,n} + j \sum_{n=k-N+1}^k b_{h,n}) \quad (7)$$

在内存中保存 $a_n, b_n, n = k-N+1, k-N+2, \dots, k$

共 $2N$ 个数据, 并由式(7)计算 k 时刻的测量结果。在下一采样时刻, 只需计算

$$a_{h,k+1} = x_{k+1} \cos[\frac{2\pi}{N}(k+1)h], b_{h,k+1} = -x_{k+1} \sin[\frac{2\pi}{N}(k+1)h] \quad (8)$$

并将 a_n, b_n 更新为 $n = k-N+2, k-N+3, \dots, k+1$, 然后仍按式(7)计算 $k+1$ 时刻的测量值。

只要测量需要, 上述过程就一直可以滚动下去。在这种情况下, 要计算出基波分量的实部和虚部共需 2 次乘法法和 $2(N+1)$ 次加法运算。较基本算法而言, 省去了 $2N$ 次乘法运算, 故可节约至少一半以上的计算时间。虽然, 该方法较递推法相比, 仍具有可观的计算工作量, 但没有截断误差的累积效应, 因此适用于计算资源和存储资源相对富余的 DSP 处理器。

4 算例^[1, 7, 8]

我们以一个简单的算例来检验本文提出的算法思想。图 1、图 2 给出了仿真结果。图中, (a) 呈现了被测信号在时域中的变化; (b) 为测量算法的输出值, 是基波分量在各个离散计算点的响应。图 1 中, 被测信号除包含基波 (频率为 50 Hz) 外还包含有

幅值为 $1/n$ 的 n 次谐波, $n=3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$ 。由采样定理, 在一个基波周期内的采样点数选为 $N=32$ 。图 1 表示其基波分量由 0.2 阶跃地变化到 1.0 (在 $t=0.04$ s 时刻, 下同) 时的结果。而对于图 2, 各次谐波间幅值比例保持不变, 即为 $1:1/3:1/5:1/7:1/9:1/11:1/13:1/15$, 但其总体的幅值系数 (即该信号的衰减系数) 由 0.2 阶跃地变化到 1.0。

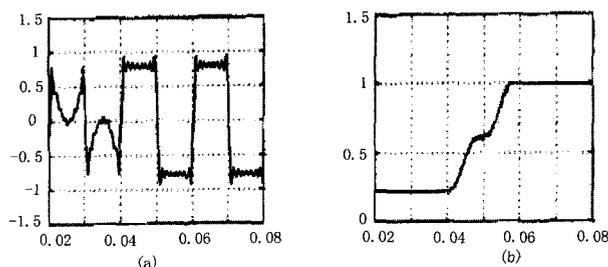


图 1 仿真结果 1

Fig.1 Result of simulation No.1

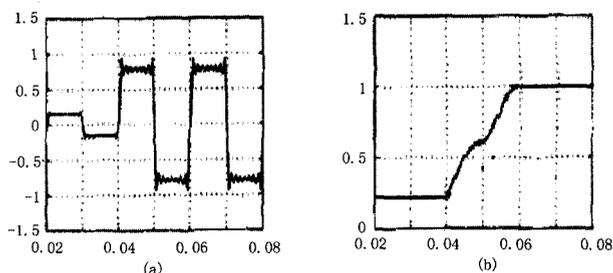


图 2 仿真结果 2

Fig.2 Result of simulation No.2

结果可以看出, 所研究的算法不仅能够大大减少常规算法的计算量, 而且其结果的响应速度较常规算法 (至少滞后一个基波周期) 有明显的提高。

5 结论

由上面讨论的内容可知, 这三种算法的特性和输出对信号输入的响应是相同的, 但计算方法各具特点: 基本算法体现了该测量算法的基本原理, 但具有最大的计算量, 因而是不可实用的; 递推算式具有最小的计算工作量, 且每一步的计算量与每个基波周期中的采样点数无关, 然而, 软件系统的设计必须设法避免由于计算过程中对数据的截断所产生的误差累积效应; 快速算法是基本算法与递推算法的折中, 其计算工作量也处于前两种算法之间, 因为较基本算法速度快一倍以上, 因而称之为快速算法, 由于它不存在误差累积效应, 速度较快, 因而可被用于实时控制、无功功率和谐波补偿、以及功率和

能量实时计算等诸多方面。

参考文献

- [1] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [2] Testa A, Gallo D, Langella R. On the Processing of Harmonics and Interharmonics: using Hanning Window in Standard Framework[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 28-34.
- [3] 吴笃贵, 贺春, 易永辉. 一种新颖的频率跟踪算法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 39-43. WU Du-gui, HE Chun, YI Yong-hui. A Novel Frequency Tracking Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 39-43.
- [4] 祈才君, 陈隆道, 王小海, 等. 应用插值 FFT 算法精确估计电网谐波参数[J]. 浙江大学学报, 2003, 37(1): 37-42. QI Cai-jun, CHEN Long-dao, WANG Xiao-hai, et al. Accurate Evaluation of Power Harmonic Parameters Using Interpolation FFT Algorithm[J]. Proceedings of Zhejiang University, 2003, 37(1): 37-42.
- [5] Lobos T, Kozina T, Leonowicz Z. High Resolution Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics and Systems[A]. In: ISCAS 2000-IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Geneva (Switzerland): 2000. 553-556.
- [6] Leonowicz Z, Lobos T, Resmez J. Advanced Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 1-6.
- [7] 孙志忠, 袁慰平, 闻震初. 数值分析 (2 版) [M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- [8] 陈光大, 关承英, 周鑫玉. 一种基于滑动窗口的电量谐波分量递推算法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(5): 38-41. CHEN Guang-da, GUAN Cheng-ying, ZHOU Xin-yu. A Recurrence Algorithm for Harmonics Calculation Based on a Sliding Window[J]. J Wuhan Univ of Hydr & Elec Eng, 1999, 32(5): 38-41.
- [9] 李晨, 张杭, 张爱民, 等. 一种能滤除衰减直流分量的新递推离散傅氏算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 17-20. LI Chen, ZHANG Hang, ZHANG Ai-min, et al. A Recursive Discrete Fourier Algorithm for Filtering Decaying DC Component[J]. Relay, 2005, 33(17): 17-20.
- [10] 李庚银, 陈志业, 宁宇, 等. 快速傅立叶变换的两种改进算法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 37-40. LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, NING Yu, et al. Comparison of Two Approaches for Harmonic Current Extraction[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 37-40.

(下转第 75 页 continued on page 75)

自动调节换流变分接头档位。在自动控制模式下,运行人员不能手动升降分接头。自动控制模式下的分接头调节主要包括角度控制、 U_{d10} 控制以及起动位置控制。

角度控制是一种标准的分接头控制模式,整流侧为 α 控制,逆变侧为 γ 控制。当极解锁后,如果运行人员选择了角度控制,则该控制起作用。整流侧 α 控制使触发角在 $12.5^\circ \sim 17.5^\circ$ 之间,逆变侧 γ 控制使熄弧角在 $17.5^\circ \sim 21.5^\circ$ 之间。如果实际的角度超过此范围则换流变分接头开始动作。为了避免快速响应,实际测量到的角度要经过 500 ms 的平滑滤波。

U_{d10} 控制就是维持计算得到的换流变二次侧电压 ($U_{d10Calc}$) 在一定的电压范围内,如果计算的 $U_{d10Calc}$ 小于下限参考值时,分接头降低,提高换流变二次侧电压,使其恢复到参考值范围内,反之分接头上升,使其恢复到参考值范围内。在自动控制模式下,当换流变断路器闭合后分接头控制将强制为 U_{d10} 控制,这可保证在换流器解锁以前,两侧的换流变二次侧电压在理想的电压水平。

4 总结

本文以云广 ± 800 kV 特高压直流工程为背景,针对其 12 脉串联双阀组主接线方式,详细分析了特高压直流系统在控制系统方面的功能配置和协调,包括双极控制层、极控制层和阀组控制层的功能及协调。双极层控制包括双极功率控制、稳定控制、功率方向控制、电流平衡控制、轻载无功优化等功能,主要产生用于控制的功率指令;极控制层包括极解锁/闭锁顺序、直流线路故障重启顺序、极电流限制、极电流协调、低压限流环节等功能,主要完成与极相关的控制功能,极控制层从双极控制层接收功率参考值并进一步产生阀组层控制所需的电压电流等参考值;阀组层主要配置为高速闭环控制功

能,包括直流电流控制、直流电压控制、熄弧角控制三个高速闭环控制器及慢速的换流变分接头控制等。特高压直流系统控制功能的分层结构,为其复杂的运行方式提供了方便。此外,本文还讨论了特高压直流输电系统与常规直流输电系统的不同之处,以充分发挥其双阀组的结构优点,最大可能地提高特高压直流系统的输电容量。

参考文献

- [1] 陈潜,张尧,钟庆,等. ± 800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J].继电器,2007,35(16):27-32.
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of ± 800 kV UHVDC System Under Different Operation Modes[J].Relay, 2007,35(16):27-32.
- [2] ED4 341 CS-C, 云广工程直流极控系统技术规范书, [S]. 2007..
ED4 341 CS-C, Yunnan-Guangdong Line ± 800 kV DC Transmission Project C/P Design Specification[S].
- [3] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.122-136.
ZHAO Wan-jun. HVDC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 122-136.
- [4] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 138-183.
DAI Xi-jie. Introduction of DC Trans[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990. 138-183.

收稿日期: 2009-03-16; 修回日期: 2009-04-06

作者简介:

周君文(1968-), 男, 工程师, 从事高压直流控制设计;
E-mail: zhoujunwen@xjgc.com

刘涛(1978-), 男, 工程师, 从事高压直流软件设计;
李少华(1982-), 男, 从事高压直流输电系统研究。

(上接第 65 页 continued from page 65)

[11] 庞浩, 李东霞, 俎云霄. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.

PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An Improved Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Using FFT Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.

[12] 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.

ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3):63-66.

收稿日期: 2008-06-25; 修回日期: 2008-10-07

作者简介:

陈赞(1977-), 女, 博士研究生, 研究方向为电能质量及其控制; E-mail:hncy1023@tom.com

陈光大(1953-), 男, 博士, 教授, 研究方向为灵活电力系统。