

一种适用于自动准同期装置的改进傅立叶相位差算法

周斌

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 在微机自动准同期装置中, 相位差的测量是同期判断的关键因素。目前国内大量采用零交法测量同期点两侧相位差, 其在谐波等干扰条件下误差较大。相位差的傅立叶算法具有抗谐波干扰能力, 但在同期点两侧频差较大时, 存在计算误差。对不同步采样条件下交流信号的傅氏变换结果进行分析, 对相位差的傅氏算法进行了改进, 并进行仿真、实验, 证明可以提高测量精度。目前该算法已经应用在具有同期功能的变电站测控装置中, 获得了满意的效果。

关键词: 准同期; 相位差; 傅立叶变换

An improved phase difference algorithm based on Fourier transform for quazi-synchronous device

ZHOU Bin

(NARI Technology Co.,Ltd, Nanjing 210003, China)

Abstract: The measurement of phase difference is the key factor in microprocessor-based automatic synchronizing device. So far the zero-crossing method of phase difference is prevailing domestically. But its deviation is considerable on the condition of harmonic disturbance. The Fourier transform algorithm can resist the harmonic disturbance. But the calculation deviation exists when the frequency difference between the two sides of the synchronizing closing points is great. The Fourier transform result of asynchronously sampled values of alternate signals is analyzed. The algorithm is developed. The digital simulation and test of the improved algorithm are done. It is proved that the improved algorithm can improve the measurement accuracy. The algorithm is applied in the substation automation measuring and control device with synchronization function. The effect is satisfactory.

Key words: quasi-synchronization; phase difference; Fourier transform

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0037-03

0 引言

在微机自动准同期装置中, 相位差是判断是否最佳合闸的关键因素^[1]。目前在微机自动准同期装置中普遍采用过零比较方法, 将两个正弦信号转换为方波来求相位差^[2-5], 该方法每计算一次相位角至少需要半个信号周期, 两计算点之间其他时刻的相位差只有通过线性插值法来估算^[1]。而且, 该方法抗干扰能力较差, 当信号受谐波和噪声干扰而发生波形畸变时, 相位差的测量误差很大。随着电网中电力电子器件的大量使用, 电力系统谐波污染日益严重^[6]。在谐波等干扰条件下, 采用零交法测量断路器两侧的相位角进行断路器的同期合闸判断, 将影响电网同期合闸的准确性和可靠性, 甚至影响电网的安全和稳定。

文献[7]提出了采用傅立叶变换计算相位差的方法, 从受谐波干扰污染的输入信号中抽取基波分量, 求出基波分量的虚部和实部, 再利用其比值的反正切求出相位角, 进而求出两个信号的相位差。

该方法抗谐波干扰能力强, 实时性较好, 适用于电力系统的相位计算^[1]。该方法假定采样频率是信号频率的整数倍, 否则计算出的相位存在采样不同步误差^[7], 因此必须进行频率跟踪采样。但是, 同期点两侧存在着不同步的两个电压信号, 而同期装置一般只有一个采样频率, 装置只能对其中一个信号进行频率跟踪采样。这样当断路器两侧电压的频差较大时, 相位差的计算误差也较大。本文对该方法进行了分析和研究, 并对算法进行了改进, 使之可以高精度地测量断路器两侧不同频率信号之间的相位差, 满足自动准同期功能的要求。

1 相位差的改进傅立叶算法

设断路器一侧为系统电压 u_a , 其基波频率为 f_a 。假定装置采样频率为基频的 N 倍, 即 Nf_a , 取时间窗为一个基波周期 T_a ($T_a=1/f_a$), 对 u_a 进行傅立叶变换, 计算出基波的实部和虚部分别为 $U_{a1r} = U_{a1m} \cos \varphi_{a1}$ 和 $U_{a1i} = U_{a1m} \sin \varphi_{a1}$ 。

由此得电压 u_a 的基波相位角

$$\varphi_{a1} = \arctg\left(\frac{U_{ali}}{U_{alr}}\right) \quad (1)$$

由于采样频率是 u_a 基波频率的整数倍,其相位的计算公式是精确的,而当断路器另一侧的同期电压 u_x 的频率 f_x 和 u_a 频率不同时,其相位角计算需要进行修正。考虑有限次数谐波,同期电压信号 u_x 可由式(2)表示

$$u_x(t) = c_{x0} + \sum_{h=1}^n U_{xhm} \cos(2\pi h f_x t + \varphi_{xh}) \quad (2)$$

其中: c_{x0} 为电压 u_x 的直流分量; U_{xhm} 为电压 u_x 基波和各次谐波的幅值; φ_{xh} 为基波和各次谐波的初始相位角。

需要计算的是电压 u_x 的基波相位角 φ_{x1} 。

采样频率为 Nf_a ,在区间 $[0, T_a]$ 内对电压 u_x 进行傅立叶变换。设 $\Delta f = f_x - f_a$,电压 u_x 基波的实部 U_{x1r} 的表达式为:

$$U_{x1r} = \frac{2}{T_a} \int_0^{T_a} \sum_{h=1}^n U_{xhm} \cos(2\pi h f_x t + \varphi_{xh}) \cos(2\pi f_a t) dt$$

经积分运算、三角变换和化简,得:

$$U_{x1r} = \frac{2}{\pi T_a} \sum_{h=1}^n \frac{h U_{xhm} f_x}{h^2 f_x^2 - f_a^2} \cos(\pi h \Delta f T_a + \varphi_{xh}) \sin(\pi h \Delta f T_a) \quad (3)$$

由于基波幅值 U_{x1m} 远大于谐波幅值 U_{xhm} ,更重要的是由于 $f_x \approx f_a$, $h=1$ 项的分母 $f_x^2 - f_a^2$ 远远小于 $h \neq 1$ 的 $h^2 f_x^2 - f_a^2$,即式(3)中 $h \neq 1$ 的分量相对于 $h=1$ 的分量可以忽略不计。因此,电压 u_x 基波的实部 U_{x1r} 的表达式可近似化简为:

$$U_{x1r} = \frac{2U_{x1m}f_x}{\pi T_a(f_x^2 - f_a^2)} \cos(\pi \Delta f T_a + \varphi_{x1}) \sin(\pi \Delta f T_a) \quad (4)$$

同样,电压 u_x 基波的虚部 U_{x1i} 的表达式为:

$$U_{x1i} = -\frac{2}{T_a} \int_0^{T_a} \sum_{h=1}^n U_{xhm} \cos(2\pi h f_x t + \varphi_{xh}) \sin(2\pi f_a t) dt$$

经积分计算、三角变换和近似化简,得:

$$U_{x1i} = \frac{2U_{x1m}f_a}{\pi T_a(f_x^2 - f_a^2)} \sin(\pi \Delta f T_a + \varphi_{x1}) \sin(\pi \Delta f T_a) \quad (5)$$

将式(5)和式(4)相除,得:

$$\frac{U_{x1i}}{U_{x1r}} = \frac{f_a}{f_x} \cdot \operatorname{tg}(\pi \Delta f T_a + \varphi_{x1}) \quad (6)$$

时间窗 $[0, T_a]$ 内,电压 u_x 基波的相位角 φ_{x1} 表达式为:

$$\varphi_{x1} = \arctg\left(\frac{f_x}{f_a} \cdot \frac{U_{x1i}}{U_{x1r}}\right) - \pi \Delta f T_a \quad (7)$$

综合(1)、(7),得改进相位差公式为:

$$\delta = \arctg\left(\frac{f_x}{f_a} \cdot \frac{U_{x1i}}{U_{x1r}}\right) - \pi \Delta f T_a - \arctg\left(\frac{U_{ali}}{U_{alr}}\right) \quad (8)$$

如果忽略 f_a 和 f_x 的差异,令(8)式中 $\Delta f = 0$,改进算法就成为传统算法。由于同期装置必然要计算同期点两侧的频率,装置可以选择抗干扰能力强的高精度频率算法^[8-9]计算两侧频率,然后代入式(8),就可以得出更为准确的相位差。

2 算法的进一步推广

现在有许多具有同期功能的保护测控装置采用固定的频率采样,采样频率一般是系统额定频率 f_0 的整数倍,因而无法对断路器一侧电压 u_a 进行频率跟踪,即采样时间窗频率 $f_0 \neq f_a$,此时可以利用测量获得的电压 u_a 的频率 f_a 采用和前面类似的方法对式(8)进行进一步修正,生成更为通用的相位差算法,经推导,相位差公式为:

$$\delta = \arctg\left(\frac{f_x}{f_0} \cdot \frac{U_{x1i}}{U_{x1r}}\right) - \arctg\left(\frac{f_a}{f_0} \cdot \frac{U_{ali}}{U_{alr}}\right) - \pi \Delta f T_0 \quad (10)$$

其中: f_0 为采样时间窗频率,一般为电网额定频率50 Hz; T_0 为采样时间窗周期, $T_0=1/f_0$,一般为20 ms; $\Delta f = f_x - f_a$ 。

3 算法的仿真

3.1 改进算法和传统算法的比较

传统傅立叶相位差算法随着频差增大,误差增加。根据《中华人民共和国机械行业标准—自动准同期装置JB/T3950-1999》要求,当断路器两侧频差周期大于2 s时,同期装置应能正确合闸^[10],即同期点两侧频差可能达到0.5 Hz。表1和表2运用Matlab仿真,分别给出了两个信号频差达到0.5 Hz时,采用传统傅立叶算法和改进算法的相位差计算结果。其中采样频率是1600 Hz。表中给出了半个滑差周期内,每隔一定时间,对一个周波32个采样点进行傅立叶变换,得出的相位差的计算结果和误差。

表1输入的两个电压信号的频率分别为50 Hz和50.5 Hz,由表1可以看出,当信号频差达到0.5 Hz时,采用传统算法,相位差误差达到2.03°,而且最大误差和最小误差的差达到0.6°,说明测量结果有一定的波动性。而采用改进算法,最大误差和误差的波动均只有0.11°,说明相位差计算的准确度和一致性都得到很大的提高。表2输入的两个电压信号的频率分别为50 Hz和49.5 Hz,得出的结论和表1相同。改变信号的频率和初相角进行仿真实验,改

进算法相对于传统算法的计算精度都得到较大提高。这说明改进算法比传统傅立叶算法更为精确和稳定。

表1 改进算法和传统算法在信号频率为50 Hz和50.5 Hz时相位差的计算结果, 其中: $u_a(t) = 100\cos(100\pi t)$ 和 $u_x(t) = 100\cos(101\pi t)$

Tab.1 Calculation result of the phase difference between a 50Hz signal and a 50.5Hz signal, applying the traditional algorithm and the improved one

| 时 刻 /s | 理论相 位差 / (°) | 传统傅立叶算法 | | 改进傅立叶算法 | |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | | 计算相位 差/ (°) | 误差 / (°) | 计算相位差 / (°) | 误差 / (°) |
| 0 | 0 | 1.78 | 1.78 | 0.00 | 0.00 |
| 0.1 | 18.0 | 19.61 | 1.61 | 17.99 | -0.01 |
| 0.2 | 36.0 | 37.49 | 1.49 | 35.96 | -0.04 |
| 0.3 | 54.0 | 55.46 | 1.46 | 53.93 | -0.07 |
| 0.4 | 72.0 | 73.54 | 1.54 | 71.90 | -0.10 |
| 0.5 | 90.0 | 91.71 | 1.71 | 89.89 | -0.11 |
| 0.6 | 108.0 | 109.88 | 1.88 | 107.90 | -0.10 |
| 0.7 | 126.0 | 128.00 | 2.00 | 125.93 | -0.07 |
| 0.8 | 144.0 | 146.03 | 2.03 | 143.96 | -0.04 |
| 0.9 | 162.0 | 163.94 | 1.94 | 161.99 | -0.01 |
| 1.0 | 180.0 | 181.78 | 1.78 | 180 | 0.00 |

表2. 改进算法和传统算法在信号频率为50 Hz和49.5 Hz时相位差的计算结果, 其中: $u_a(t) = 100\cos(100\pi t)$ 和 $u_x(t) = 100\cos(99\pi t)$

Tab.2 Calculation result of the phase difference between a 50Hz signal and a 49.5 Hz signal, applying the traditional algorithm and the improved one

| 时 刻 /s | 理论相 位差 / (°) | 传统傅立叶算法 | | 改进傅立叶算法 | |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | | 计算相位 差/ (°) | 误差 / (°) | 计算相位差 / (°) | 误差 / (°) |
| 0 | 0 | -1.82 | -1.82 | 0.00 | 0.00 |
| 0.2 | -36.0 | -38.03 | -2.03 | -35.96 | 0.04 |
| 0.4 | -72.0 | -73.85 | -1.85 | -71.90 | 0.10 |
| 0.6 | -108.0 | -109.52 | -1.52 | -107.90 | 0.10 |
| 0.8 | -144.0 | -145.5 | -1.50 | -143.97 | 0.03 |
| 1.0 | -180.0 | -181.82 | -1.82 | -180 | 0.00 |

3.2 谐波条件下改进算法的精度

本文第2节公式推导时, 对谐波情况进行了适当的近似分析, 为考察谐波条件下算法的性能, 本文应用Matlab工具对输入信号中叠加谐波的情况进行了仿真。表3给出了两个信号基波频差达到0.5 Hz, 二次谐波畸变率达20%, 三次谐波畸变率达10%, 采用改进算法的相位差计算结果, 其采样频率是1600 Hz。表中给出了半个滑差周期内, 每隔200 ms, 对一个周波32个采样点进行傅立叶变换, 得出的相位差的计算结果和误差, 相位差的测量误差小于0.3°, 精度非常高。改变谐波次数和初相角, 测量精度都非常高。这说明改进算法在谐波条件下仍

然具有较高的相位差测量精度, 具有较高的抗谐波干扰能力, 适合在自动准同期装置中使用。

表3 改进算法在谐波条件下的相位差计算结果, 其中: $u_a(t) = 100\cos(100\pi t) + 20\cos(200\pi t) + 10\cos(300\pi t)$ $u_x(t) = 100\cos(101\pi t) + 20\cos(202\pi t) + 10\cos(303\pi t)$

Tab.3 Calculation result of the phase difference applying the improved algorithm on the condition of harmonic disturbance

| 时刻 /s | 理论相位差 / (°) | 改进傅立叶算法 | |
|----------|----------------|------------|---------|
| | | 计算相位差/ (°) | 误差/ (°) |
| 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 0.2 | 36.0 | 36.05 | 0.05 |
| 0.4 | 72.0 | 72.24 | -0.24 |
| 0.6 | 108.0 | 108.10 | 0.10 |
| 0.8 | 144.0 | 143.97 | -0.03 |
| 1.0 | 180.0 | 180 | 0.00 |

4 结论和应用

同期点两侧相位差的傅立叶算法只从输入信号中提取基波分量进行分析, 因而具有较强的抗谐波干扰能力。但为了获得较高的精度, 要求装置对信号进行频率跟踪采样。同期装置需要同时测量两路不同频率的电压信号, 不能对二者同时跟踪采样, 因而造成的相位差测量的不同步误差。当频差较大时, 误差增加。本文介绍的改进算法利用装置测量的断路器两侧电压频率对相位差测量误差进行了修正, 提高了测量精度, 适合在微机自动准同期装置中使用。我们已经在具有同期功能的中高压变电站测控装置中采用该算法, 经测试和现场应用, 获得了满意的效果。

参考文献

- [1] 陈小桥, 周水斌, 王先培, 等. 一种新的相位(差)算法及其在自动准同期中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(6): 96-99.
CHEN Xiao-qiao, ZHOU Shui-bin, WANG Xian-pei, et al. A New Phase Algorithm and Its Application to Automatic Synchronization Equipment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(6): 96-99.
- [2] 彭晓涛, 王少荣, 程时杰. 高性能微机自动准同期装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 75-77.
PENG Xiao-tao, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. A High Performance Microprocessor-based Automatic Quasi-synchronization Device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 75-77.
- [3] 粟梅, 郭旭东, 官诗军. 一种新型的微机自动准同期装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(3): 60-61.
SU Mei, GUO Xu-dong, GUAN Shi-jun. New Type Microprocessor-based Automatic Synchronization device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(3): 60-61.

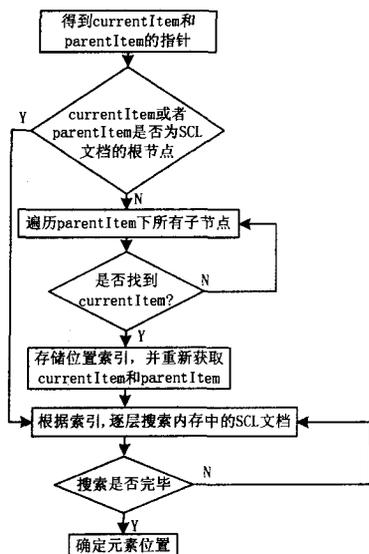


图3 元素定位模块流程图

Fig.3 Flow process diagram of element allocation mode

3 结论

厂站内智能电子装置的 SCL 文档配置工具是实现新型电力远动通信系统的一项重要内容, 正得到人们越来越多的关注。本文针对 SCL 文档的特点, 提出了 SCL 文档配置工具的设计和实现方法, 为实现高效、灵活的新型电力远动系统做了有益的探索。

参考文献

[1] 尹家凡, 王孙安, 盛万兴. XML语言在变电站设备描

(上接第 39 页 continued from page 39)

- [4] 郭建, 周斌. 新型微机自动准同期装置设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8):77-81.
GUO Jian, ZHOU Bin. Design of Microprocessor-based Automatic Quasi-synchronization Device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8):77-81.
- [5] 李俊霞, 涂仁川, 严兵, 等. 一种微机型自动准同期装置[J]. 继电器, 2002, 30(9): 53-54.
LI Jun-xia, TU Ren-chuan, YAN Bing, et al. A Microprocessor-based Automatic Synchronizing Device[J]. Relay, 2002, 30(9):53-54.
- [6] 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-hang, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3):63-66.
- [7] 李振然. 利用傅里叶变换实现微机自动准同期[J]. 继电器, 1994, 22(4): 35-40.
LI Zhen-ran. Realization of Microprocessor-based Automatic Synchronizing Device Based on FFT Algorithm[J]. Relay, 1994, 22(4):35-40.

述中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2003, 21: 209-210.
YIN Jia-fan, WANG Su-nan, SHENG Wang-xin. XML's Application in Device Description in Substation[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 21: 209-210.

- [2] 兰森林, 张沛超. 基于 SCL 模型 IED 配置器的设计与实现[J]. 继电器, 2005, 33(12): 48-51.
LAN Sen-lin, ZHANG Pei-chao. Design and Implementation of IED Configurator Based on SCL Model[J]. Relay, 2005, 33(12): 48-51.
- [3] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-15.
TAN Wen-shu. Analysis of IEC 61850 Communication Networks and System in Substations[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 8-15.
- [4] 谭文恕. 电力系统无缝通信体系结构[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 1-4.
TAN Wen-shu. Seamless Communication Architecture in Power Systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 1-4.
- [5] 李勇军, 冀汶莉, 马光思. 用 DOM 解析 XML 文档[J]. 计算机应用, 2001, 21(8): 103-105.
LI Yong-jun, JI Wen-li, MA Guang-si. Parsing XML Document by DOM[J]. Journal of Computer Applications, 2001, 21(8):103-105.

收稿日期: 2007-02-06;

修回日期: 2007-03-15

作者简介:

陈少君 (1968-), 男, 工程师, 从事火电厂机组检修和信息管理工作; E-mail: chenshaojun1968@126.com

程晓 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电厂信息管理系统研究。

[8] 李一泉, 何奔腾. 一种基于傅氏算法的高精度测频方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 26(2): 78-81.

LI Yi-quan, HE Ben-teng. A High-Accuracy Algorithm for Measuring Frequency of Power System Based on Fourier Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 26(2):78-81.

[9] 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.

[10] JB/T3950-1999, 中华人民共和国机械行业标准—自动准同期装置 [S].

JB/T3950-1999, Mechanical Standard of the People's Republic of China-Automatic Accurate Synchronizers [S].

收稿日期: 2007-04-04;

修回日期: 2007-05-05

作者简介:

周斌 (1970-), 男, 高级工程师, 长期从事变电站自动化设备的开发研究工作。E-mail: zhoub@naritech.cn