

电气设备谐波干扰性检测与评估方案

张小雷

(中国广核新能源控股有限公司, 合肥 230000)

摘要: 针对风力发电、光伏发电新能源出现的谐波干扰性问题, 提出了电气设备谐波干扰性检测与评估方案, 设计了电气设备谐波检测系统, 包含六大部分: 主控电路、电压采样电路、波形转换电路、同步锁相倍频电路、A/D 转换电路和液晶显示电路; 实现了电气设备信号的采集、波形的转换、信号的倍频放大和信号的显示功能; 并且还采用了基于改进 DFT 和时域准同步算法进行电气设备谐波的检测, 实现对谐波精准、稳定的检测; 此外还研究了对电气设备谐波评估的方法, 采用非干预式估计法对电气设备谐波进行评估, 实现了对负荷运行没有影响的情况下进行电气设备谐波的评估; 试验表明, 本研究电气设备谐波检测的误差在 $\pm 0.5\%$ 范围内, 具有高精度和稳定性。

关键词: 谐波检测; 谐波评估; 改进 DFT 算法; 电气设备

Harmonic Interference Detection and Evaluation Scheme of Electrical Equipment

ZHANG Xiaolei

(CGN New Energy Holdings Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: The purpose of this research was the harmonic interference problem for the new energy of wind power and photovoltaic power generation. The harmonic interference detection and evaluation plan of the electrical equipment is proposed, and the harmonic detection system is designed. It included six major parts: main control circuit, voltage sampling circuit, waveform conversion circuit, wave-lock frequency multiplication circuit, A/D conversion circuit and liquid crystal display circuit. The functions of the electrical equipment signal acquisition, waveform conversion, signal frequency multiplication and signal display are realized. And based on the improved DFT and time domain quasi-synchronous algorithms, the detection of electrical equipment harmonics is also adopted to achieve accurate and stable detection of harmonics. In addition, the harmonic evaluation method for the electrical equipment is studied, and the non-interventional estimation method is used to evaluate the harmonics for the electrical equipment, which realizes the harmonic evaluation for the electrical equipment without affecting the load operation. The test result shows that of the harmonic detection error is high accuracy and stability.

Keywords: harmonic detection; harmonic assessment; improved DFT algorithm; electrical equipment

0 引言

随着风力发电、光伏发电新能源的广泛使用, 由于风力发电和光伏发电的不稳定性, 引入了许多非线性电流电压, 导致电力设备谐波干扰性问题。因此, 对谐波的检测与评估及其重要。

对于谐波的监测与评估方案, 一些文献也做出了相关研究, 文献 [1] 基于傅里叶变换的谐波检测方法, 该方法运算速度快, 并且计算精准度高, 但是对于波动较大的信号, 不能联合分析时域信号和频域信号, 局部信号不能准确的分析其特点, 并且有一定的误差, 还有可能引起栅栏效应和频率泄露^[1]。文献 [2] 基于小波分析法的谐波检测方法, 该方法克服了傅里叶变换的波动较大的信号的检测, 但是该方法不能对电气设备的谐波进行实时检测, 并且计

算量和冗余量较大, 还有可能出现频谱混乱现象^[2]。

针对上述文献的不足, 研究所提方法提出了基于改进 DFT 和时域准同步算法的电气设备谐波检测方法, 该方法克服了傅里叶变换波动较大信号的监测, 同时可以时域信号和频域信号结合分析, 计算精准度高, 速度快。

1 电气设备谐波检测系统的硬件设计

电气设备谐波检测系统的硬件设计由六部分组成: 主控电路模块、电压采样模块、波形转换模块、同步锁相倍频模块、A/D 转换模块和液晶显示模块^[3]。该系统的总体结构图如图 1 所示。

上图所描述的功能为: 电压互感电路将电气设备中的交流电压转换成电压信号, 因为采集到的电压频率不一致, 这时采用锁相环倍频电路, 将信号放大 32 倍, 将电压信号

收稿日期: 2021-07-04; 修回日期: 2021-10-25。

作者简介: 张小雷(1985-), 男, 安徽宿州人, 大学本科, 讲师, 主要从事柔性直流输电技术, 逆变器变换控制技术和电能质量等方向的研究。

引用格式: 张小雷. 电气设备谐波干扰性检测与评估方案[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 266-271.

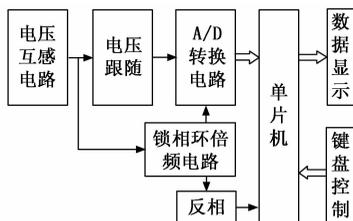


图 1 系统总体结构图

传输至 A/D 转换模块，将模拟信号转换为单片机可识别的数字信号，最后通过按键控制，在液晶显示屏上显示结果。

1) 主控电路：

该控制系统是以 P89V51RD2 微处理器为核心主控电路，此芯片包含 64 KB 的程序存储器和 1 024 字节的数据存储单元^[4]，该芯片的最小系统如图 2 所示。

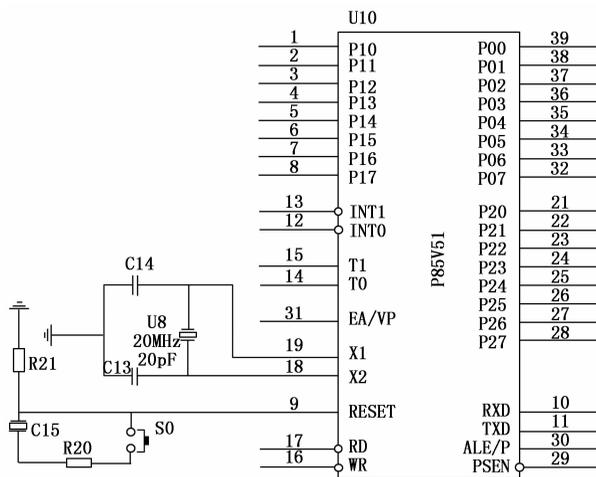


图 2 P89V51RD2 芯片的最小系统

图 2 使用的是人工复位电路，当按下复位按钮时，电路就处于高电平；时钟电路的景振频率采用的是 20 MHz。

2) 电压采样电路：

该电路采用的是 CVT 电容型电压互感器，是一种电磁式电压互感器，该互感器内部结构由铁芯和原、副绕组组成，比较稳定，并且可以防止铁芯饱和和引起铁磁谐振；该互感器基于获取信息快、信息量大互动性强、成本低的优点。用于电压采样电路，能有效的防止自产生谐波的干扰^[5]。电压采样电路图如图 3 所示。

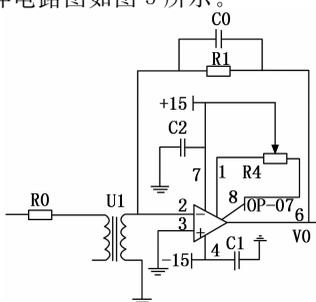


图 3 电压采样电路

3) 波形转换电路：

该电路实现了将正弦波转化为可以进行倍频的脉冲波，波形转换电路图如图 4 所示。

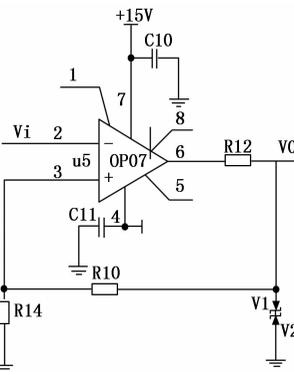


图 4 波形转换电路

该电路采用了滞回比较器，是为了避免在波形转换时出现过零点干扰；使用 OP07 超低失调电压双路运算放大器，具有超低偏移、输入偏置电流低和开环增益高的特点，能够对波动较小的信号进行精确的测量^[6]。

4) 同步锁相倍频电路：

该电路采用了 CD4060 芯片，CD4060 芯片由振荡器和 14 位二进制的串行计数器组成，具有电压范围宽，输入阻抗高的特点。锁相倍频电路将信号采集电路采集到的信号测出 32 倍频再进行输出，实现 AD574 的启动、读信号和单片机的外部中断的响应数字信号^[7]。同步锁相倍频电路图如图 5 所示。

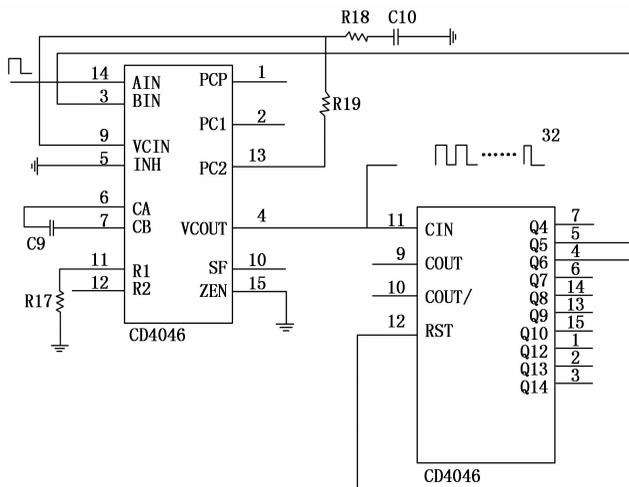


图 5 同步锁相倍频电路

5) A/D 转换电路：

该电路采用的是单片高速 12 位逐次比较型 A/D 转换器，内部设置双极性电路构成的混合集成转换显片，具有低功耗、高精度、外接元器件少的特点。该转换器内部有时钟脉冲源和基准电压源，可以实现将模拟信号精准的转换成数字信号，所以该系统采用 AD574 转换器与单片机相

连接,能够转换波动性较大的信号^[8]。

6) 液晶显示电路:

该电路采用的是 LCD1602 液晶显示器,该显示屏能够显示 32 个字符,具有低功耗、体积小、显示内容丰富、超薄轻巧的特点。利用液晶显示模块能够更加形象直观的显示数据处理的结果。

2 基于改进 DFT 和时域准同步算法的电气设备谐波检测

本研究采用了基于改进 DFT 和时域准同步算法^[9],来实现电气设备谐波的检测。此方法共分为 3 个步骤。

1) 改进 DFT 计算电气设备基波频率:

采用多谱线插值法计算基波频率,采集电路以 50 Hz 的频率信号采样,样本频率为 f_s ,计算得到离散时间信号为:

$$x(n) = A_1 \sin[2\pi(f_1/f_s)n + \varphi_1] \quad (1)$$

式中, A_1 表示基波的幅值 (V), f_1 表示频率 (Hz), φ_1 表示初相位 ($^\circ$)。 $n = 0, 1, 2, \dots, N-1, N$ 为采样的点数。

利用窗函数 $w(n)$ 处理式 (1) 中的 $x(n)$ 信号,得到加窗后信号的 DFT 表达式为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W^{nk} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

式 (2) 中, $W = e^{-j(2\pi/N)}$, 写成矩阵的形式为:

$$\begin{pmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \vdots \\ X(N-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W^0 & W^0 & \dots & W^0 \\ W^0 & W^{1 \times 1} & \dots & W^{(N-1) \times 1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W^0 & W^{1 \times (N-1)} & \dots & W^{(N-1) \times (N-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \vdots \\ X(N-1) \end{pmatrix} \quad (3)$$

对采集到的信号进行分段时,由于栅栏效应,信号的频率与抽样频点很难对齐,因此 $k = \frac{f_1}{\Delta f}$ 通常不为整数。

电气设备信号基波的频率大多数为 50 Hz,误差在 ± 1 Hz。设 $f_1^* = 50$ Hz, 50 Hz 处的谱线记为 k_2 ,其左边的谱线记为 k_1 ,右边的谱线记为 k_3 ,记 $\xi = k - k_2$,且 $-1 < \xi < 1$,则有:

$$X(k_1) = W^0 x(0) + W^{1 \times k_1} x(1) + W^{2 \times k_1} x(2) + \dots + W^{(N-1) \times k_1} x(N-1) \quad (4)$$

将计算出的信号记为 $y_1 = |X(k_1)|$ 、 $y_2 = |X(k_2)|$ 、 $y_3 = |X(k_3)|$ 。

将 3 根谱线用插值修正,并且利用的插值公式为:

$$\alpha = \frac{y_3 - y_1}{y_2} \quad (5)$$

结合式 (2) 和 (5) 可得:

$$\alpha = \frac{|W(1-\xi)| - |W(-1-\xi)|}{|W(-\xi)|} \quad (6)$$

$$\xi = f^{-1}(\alpha) \approx d_1 \alpha + d_3 \alpha^3 + \dots + d_{2l+1} \alpha^{2l+1} \quad (7)$$

式中, l 表示自然数, $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{2l+1}$ 为 $2l+1$ 次逼近多项式的奇次项系数。

最后可估计电气设备基波频率为:

$$\begin{cases} f_1 = k\Delta f = (k_2 + \xi - 1)\Delta f \\ \Delta f = f_s/N \end{cases} \quad (8)$$

2) 利用电气设备的基波频率,重新构建准同步序列:

对于采集到的采样信号离散数据 $(k_i, x(k_i))$,采用三次插值计算^[10],得到插值多项式 $P(x(k))$ 为:

$$P(x(k)) = S_i \frac{(x(k) - x(k_{i+1}))^3}{6h_i} - S_{i+1} \frac{(x(k) - x(k_i))^3}{6h_i} + \left[P(x(k_{i+1})) - \frac{S_{i+1}h_i^2}{6} \right] \frac{x(k) - x(k_i)}{h_i} + \left[P(x(k_i)) - \frac{S_i h_i^2}{6} \right] \frac{x(k_{i+1}) - x(k)}{h_i} \quad (9)$$

式中, $x(k) \in [x(k_i), x(k_{i+1})]$ ($i = 0, 1, \dots, N-1$); $h_i = x(k_{i+1}) - x(k_i)$; $S_i = P''(x(k_i))$ 。且:

$$P''(x(k)) = S_i \frac{x(k_{i+1}) - x(k)}{h_i} + S_{i+1} \frac{x(k) - x(k_i)}{h_i} \quad (10)$$

3) 电气设备谐波参数的计算:

设 $x_n(k_i)$ 为采样序列,采样序列中的谐波频率不能确定,因此使用 FFT 算法结合双峰谱线算法来计算电气设备谐波参数。因为谐波频率不是基波频率的整数倍,所以使用谐波谱峰搜索方法,实现在频谱上找到谐波的最大谱线^[11]。则有:

$$A_{\theta} = \frac{2(Y_{\text{abs}}(2) + 2Y_{\text{abs}}(1) + Y_{\text{abs}}(3))}{|W(-1-\xi)| + 2|W(-\xi)| + |W(1-\xi)|} \quad (11)$$

式中, Y_{abs} 表示频谱的绝对值,其中 $Y_{\text{abs}}(1) = 0.5A_{\theta} |W(-\xi)|$, $Y_{\text{abs}}(3) = 0.5A_{\theta} |W(1-\xi)|$, $Y_{\text{abs}}(2) = 0.5A_{\theta} |W(-1-\xi)|$ 。

当 N 的值较大时,令:

$$g(\xi) = 2/[|W(-1-\xi)| + 2|W(-\xi)| + |W(1-\xi)|] \quad (12)$$

化简式 (11) 得:

$$A_{\theta} = (Y_{\text{abs}}(2) + 2Y_{\text{abs}}(1) + Y_{\text{abs}}(3))g(\xi) \quad (12)$$

计算得到电气设备初谐波相位修正公式为:

$$\varphi_{\theta} = \arg[Y_{\text{abs}}(1)] + \pi/2 - \arg[W(\xi)] \quad (13)$$

综上所述,采用基于改进 DFT 和时域准同步算法,对电气设备的谐波检测,通过计算电气设备基波的频率,重新构建准同步序列,再对电气设备谐波参数的计算,最后得到电气设备的谐波,对谐波进行分析处理,通过对谐波技术进行分析,进而能够把控电气设备中,谐波因素情况,根据检测出来的谐波信息,采取适当的措施,最终避免谐波对电气设备的危害。

3 非干预式估计法对电气设备谐波评估

本研究采用非干预式估计法对电气设备谐波进行评估,此方法是在电气设备运行的状态下进行谐波的评估,不影响系统的正常工作,通过系统本身的谐波源以及可测量的

数据参数等来估计系统侧谐波阻抗^[12]。系统侧与用户侧的等值电路图如图 6 所示。

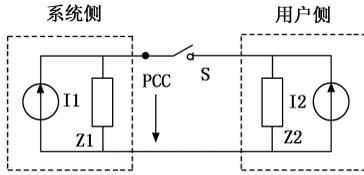


图 6 系统侧与用户侧的等值电路图

由图 6，PCC 点是测量点，测量的是由系统侧与用户侧谐波矢量叠加的谐波电压和谐波电流^[13]，由诺顿等值电路得：

$$U_{PCC} = (I_{PCC} + I_2)Z_2 \quad (14)$$

$$U_{PCC} = (I_1 - I_{PCC})Z_1 \quad (15)$$

设在某一个时间段内，记为 Δt ，谐波电流 I_1 波动，记为 ΔI_1 ，导致 PCC 点的谐波电流波动为 ΔI_{PCC-1} ，用户端的谐波电流源和谐波阻抗保持不变^[14]，则式 (14) 变为：

$$U_{PCC} + \Delta U_{PCC-1} = (I_{PCC} + \Delta I_{PCC-1})Z_2 + I_2Z_2 \quad (16)$$

由式 (16) 减去式 (14) 得：

$$Z_2 = \frac{\Delta U_{PCC-1}}{\Delta I_{PCC-1}} \quad (17)$$

同理，可以算出系统侧的谐波阻抗为：

$$Z_1 = -\frac{\Delta U_{PCC-2}}{\Delta I_{PCC-2}} \quad (18)$$

式 (16) 和式 (17) 得到的是复数，考虑到谐波阻抗的特点，谐波阻抗的实部始终为正数，因此就有， $\text{Re}[Z_1] \geq 0, \text{Re}[Z_2] \geq 0$ 。

由上述计算进一步研究，使用某一时间段内在 PCC 点处谐波电流的改变来计算谐波阻抗，具体计算方法如下^[15]。

定义在某个时间段内，PCC 点的谐波阻抗为 PCC 点的谐波电压的变化值除以谐波电流的变化值。并且阻抗的实部始终为正数，则有系统侧和用户侧谐波阻抗的均值分别为：

$$Z_2 = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta U_{PCC-1i}}{\Delta I_{PCC-1i}} \quad (19)$$

$$Z_1 = \sum_{i=1}^M \frac{\Delta U_{PCC-2i}}{\Delta I_{PCC-2i}} \quad (20)$$

式中， N 为可估计 Z_2 的样本数量， M 为可估计 Z_1 的样本数量。利用谐波阻抗，可以求出用户侧的谐波发射水平，即：

$$\Delta U_{2-\text{cont}} = \left(\frac{U_{PCC1}}{Z_2} - I_{PCC} \right) \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (21)$$

综上所述，电气设备谐波评估使用非干预式谐波方法能够有效地评估谐波的发射水平，并且只需要测量系统侧与用户侧的公共连接点的谐波电压与谐波电流的值，系统中的负荷正常工作，没有影响，进而评估谐波的干扰性。电气设备谐波的畸变，对用电有一定的危害，因此对谐波的评估是有必要的。

4 实验结果与分析

为了验证本研究基于改进 DFT 和时域准同步算法谐波检测的效果，做了大量的相关实验，本实验是以三相可控整流负载的电流为例进行计算的，并将实验结果与基于傅里叶变换的谐波检测方法和小波分析法的谐波检测方法进行对比^[16]。

在 PCSAD 中搭建三相可控整流仿真模型，并测量三相负载相电流，测得的结果如图 7 所示。

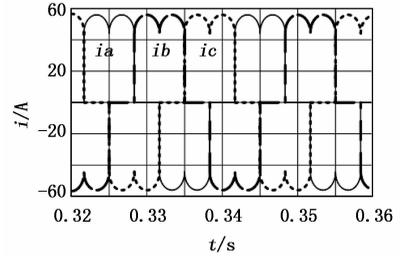


图 7 三相整流负载电流波形

在搭建好的仿真模型中，任选一根电流波形，假如选用 b 相电流波形，利用傅里叶变换的谐波检测方法和小波分析法的谐波检测方法分别计算出 b 相电流的基波分量，3 种方法的基波分量对比图如图 8 所示。

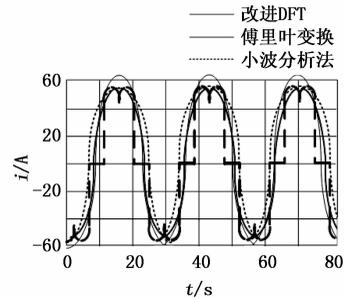


图 8 改进 DFT、傅里叶变换、小波分析检测出的基波分量对比图

由图 8 可知，改进 DFT 和时域准同步算法测得的谐波分量波形图与负载电流的波形图最相近，但傅里叶变换谐波检测和小波分析法谐波检测与负载电流有一些偏离，因此仅看基波分量的对比图就可以看出改进 DFT 和时域准同步算法的优越性，但还需要实验加以证明。

为了测得改进 DFT 和时域准同步算法谐波检测的效果，将上述计算出的基波分量按照研究所提方法提出的算法进行重构准同步序列的计算，在某一时刻突然将三相整流负载减小一半，产生电流突变过程。观察这一过程基波的变化情况^[17]，得到如图 9 基波变化情况。

由图 9 可知，在负载电流变化的这一过程中，改进 DFT 和时域准同步算法谐波检测所测得的波形随着负载电流的波形变化而变化，而基于傅里叶变换谐波检测和小波分析法谐波检测的波形没有随时改变，因此该研究基于改

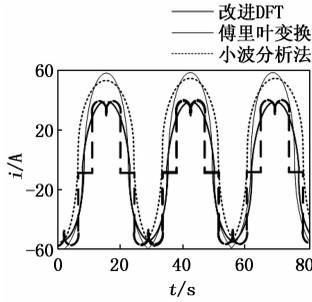


图 9 基波变化情况

进 DFT 和时域同步算法谐波检测在检测谐波是更精准。

再进行实验的下一步, 谐波参数的计算, 在构建的仿真模型中, 输入谐波源信号, 此谐波源信号是利用函数发生器所产生的基波、谐波和间谐波叠加的信号作为谐波源。实验中设置采样频率为 3.2 kHz, 当谐波远离基波时, 测得的谐波幅值的误差在 $\pm 0.5\%$ 范围内。当基波幅值为 4 V, 3 次谐波含有率为 2.5%, 间谐波含有率为 2% 时, 检测出的谐波幅值对比如表 1 所示。表 1 中的数值在环境温度为 20° , 相对湿度为 40 RH% 情况下进行的试验和数据采集。

表 1 谐波幅值对比

标准值/V	改进 DFT 测量值/V	傅里叶变换 测量值/V	小波分析 测量值/V
0.08	0.080 1	0.091 0	0.087 3
0.08	0.080 2	0.085 0	0.085 4

由表 1 可知, 改进 DFT 和时域准同步算法所测得的值与标准值相比误差在 $\pm 0.5\%$ 范围内, 然而傅里叶变换和小波分析法测得的谐波幅值误差均大于 $\pm 0.5\%$, 因此改进 DFT 和时域准同步算法在检测谐波是具有高精度。

综上, 在实验过程中改进 DFT 和时域准同步算法谐波检测的方法计算出的谐波分量明显比其它两种方法更精准, 并且在进一步的实验中, 减小三相整流负载, 在这一个电流突变的过程中, 此算法同样能够精准的检测出谐波幅值, 由此可见, 基于改进 DFT 和时域准同步算法的电气设备谐波检测的精准度和稳定性。

5 结束语

大量的风力发电、光伏发电等非线性电压电流的使用, 造成了电力设备谐波干扰性问题, 为了解决该问题, 研究所提方法提出了电气设备谐波干扰性检测与评估方案。

研究所提方法研究了一种基于改进 DFT 和时域准同步算法的谐波检测, 通过改进 DFT 和时域准同步算法进行计算基波频率, 重构准同步序列和谐波参数的计算再经过 FFT 进行频谱分析, 能够有效减小栅栏效应和频谱泄露的影响, 也避免了大幅值谐波对小幅值谐波的泄露影响, 因而能够准确地检测谐波参数。通过对电气设备信号基波频率偏移的情况下进行该系统的仿真实验, 并进行对比, 表明本系统所测得的值误差在 $\pm 0.5\%$, 具有精准度高, 稳定

性好的特点。

本研究设计了一个谐波检测的硬件系统, 该系统包括主控电路、电压采样电路、波形转换电路、同步锁相倍频电路、A/D 转换电路和液晶显示电路六大模块, 实现了信号的采集、转换、放大和显示的功能, 能够精准检测出谐波对电气设备的干扰性。

在保证谐波检测的精准度和稳定性, 该设计还是有一定的不足, 对于提高检测的实时性, 还需选择适应的方法更深入的研究。

参考文献:

- [1] 童涛, 张新燕, 刘博文, 等. 基于傅里叶同步挤压变换和希尔伯特变换的谐波间谐波检测分析 [J]. 电网技术, 2019, 432 (11): 372-380.
- [2] 古超帆, 张新燕, 童涛, 等. 基于二阶广义积分器的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法 [J]. 电测与仪表, 2020, 735 (10): 93-98.
- [3] 刘建锋, 宋子恒, 周勇良, 等. 基于确定性测量矩阵与变阈值 SAMP 的超高次谐波检测算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 567 (21): 81-89.
- [4] LU C, WU S, JIANG C, et al. Weak harmonic signal detection method in chaotic interference based on extended Kalman filter [J]. 数字通信与网络: 英文版, 2019, 5 (1): 51-55.
- [5] 张慧, 孟克其劳, 张占强, 等. 基于 CEEMDAN 和 HHT 的谐波检测方法 [J]. 电子测量技术, 2020, 338 (6): 89-93.
- [6] 李圣清, 王飞刚, 朱晓青, 等. 基于改进型小波神经网络的谐波检测方法 [J]. 电测与仪表, 2019, 056 (10): 118-121.
- [7] 杜先君, 刘洲. 遗传优化粒子滤波在动态谐波检测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31 (8): 108-114.
- [8] 张金平, 李建立, 段晨, 等. 计及负频率影响的新能源发电低频间谐波检测方法 [J]. 电测与仪表, 2020, 727 (2): 100-105.
- [9] 陈至豪, 王立德, 王冲, 等. 基于组合余弦优化窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法 [J]. 电网技术, 2020, 436 (3): 328-336.
- [10] YU T, H XIA, XIE W, et al. Orbital angular momentum mode detection of the combined vortex beam generated by coherent combining technology [J]. Optics Express, 2020, 28 (24): 35795.
- [11] ZI WEN, WANG, et al. Strain effect on the orientation-dependent harmonic spectrum of monolayer aluminum nitride [J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2020, 63 (5): 102-108.
- [12] 谭鹏, 杨洪耕, 马晓阳, 等. 计及风电场侧谐波阻抗影响的谐波发射水平评估 [J]. 电力自动化设备, 2019, 300 (4): 173-179.
- [13] 陈仁祥, 张勇, 杨黎霞, 等. 基于整周期数据和卷积神经网络的谐波减速器健康状态评估 [J]. 仪器仪表学报, 2020,

41 (2): 247-254.

- [14] 刘乾易, 李勇, 郭松, 等. 大功率电解整流系统背景谐波建模及谐波责任评估 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49 (5): 116-124.
- [15] 江友华, 陈博, 田书锦, 等. 分布式谐波监测点优化与精度评估策略研究 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35 (1): 43-52.

(上接第233页)

综上, 在分布式系统中各个节点初始同步的情况下, 存在最多不超过节点总数 1/3 的拜占庭故障节点的情况下, FTSW 算法是收敛的, 并且在无故障情况下, FTSW 算法的同步精密度较高; 当系统中存在拜占庭故障的时候, FTA 算法的同步精密度损失了 13.7%, FTSW 算法的同步精密度损失了 6.6%, FTSW 算法的同步精密度比 FTA 算法的精密度提高了 7.1%。

5 结束语

随着工业以太网的不断发展, 电力、钢铁、工业制造、自动化工业等领域在以非常迅猛的速度往前发展。如果要实现从无线到有线的巨大变化, 需要考虑到实时性和可靠性。随着分布式系统的应用越来越广泛, 系统需要分配的节点也更多, 因此发生故障的概率也越高。对于其中具有严格时间要求的系统中, 时间同步变得越来越重要。工业以太网的时钟同步问题是一个比较关键的问题。在满足时钟同步的前提下, 系统还需要具有一定的容错能力。RTEthernet 是可以同时兼顾传统以太网的新型工业级的实时以太网协议, 但是该协议的时钟同步算法容错性较低。文中引入了滑动窗口技术, 得到了一种具有较强容错能力的算法, 即 FTSW 算法。文中研究主要集中在确定性时钟同步算法, 在后续的研究中可以考虑能否将统计型和概率型算法的思想引入到 RTEthernet 的时钟同步过程中。

参考文献:

- [1] LESLIE L, MELLIAR-SMITH P M. Synchronizing Clocks in the Presence of Faults [J]. Journal of the ACM, 1985, 32 (1): 52-78.
- [2] KOPETZ H, ADEMAJ A, HANZLIK M A. Integration of Internal and External Clock Synchronization by the Combination of Clock-state and Clock-rate Correction in Fault-tolerant Distributed Systems [C] // IEEE International Real-time Systems Symposium. IEEE, 2005.
- [3] EMMANUELLE A, ISABELLE P. A taxonomy of clock synchronization algorithms [J]. Journal of the ACM, 1997, 12 (1): 25-47.
- [4] JR E, SOUZA M. An Overview of Time Discontinuities of Clock Synchronization Algorithms (1588, Welch-Lynch) and their Effects in Networked Control Systems [J]. Proceedings of

- [16] KANSE S S, YADAV D M. Hg-SVNN: Harmonic Genetic-based Support Vector Neural Network Classifier for the Glaucoma Derctiong [J]. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 2020, 20 (8): 1950065.
- [17] 李俊, 许留伟, 茆华风, 等. 非线性负荷谐波传导的谐波系数算法与验证 [J]. 强激光与粒子束, 2019, 31 (4): 29-34.
- [18] Annual Precise Time & Time Interval Systems & Applications Meeting, 2013, 11 (1): 134-149.
- [5] Dolev D, Halpern J Y, Strong R H. On the Possibility and Impossibility of Achieving Clock Synchronization [J]. Journal of Computer & System Sciences, 1986, 32 (2): 230-250.
- [6] 程玉胜, 等. 动态滑动窗口加权互信息流特征选择 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 2018, 54 (5): 974-985.
- [7] 王华伟. 安全关键性分布式系统时钟同步及算法研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2015.
- [8] 何建平. 基于一致性的无线传感器网络时钟同步算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] 邹见效. 分布式测控系统容错关键技术研究 [D]. 杭州: 电子科技大学, 2009.
- [10] 吕伟. 分布式系统下时钟同步及事件因果一致性问题研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [11] 张凤登. 分布式实时系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [12] 张凤登, 付敬奇. 实时传输网络 FlexRay 原理与范例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [13] 孙祥祥. 分布式系统时钟同步协议的研究与实现 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- [14] 刘让, 张凤登. FlexRay 时钟同步拜占庭故障容错算法研究 [J]. 软件导刊, 2020, 19 (1): 68-74.
- [15] Kessels. Two Designs of a Fault-Tolerant Clocking System [J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, C-33 (10): 912-919.
- [16] MAHANEY S, SCHNEIDER F. Inexact agreement: Accuracy, Precision and Graceful Degradation [C] // US: Proceedings of 4th International Symposium on Principles of Distributed Computing, 1985.
- [17] ANCEAUME E, PUAUT I, SOLIDOR P. Performance Evaluation of Clock Synchronization Algorithms [D]. France: Campus universitaire de Beaulieu, 1998.
- [18] SWAIN A R, HANSDAH R C. A Model for the Classification and Survey of Clock Synchronization Protocols in WSNs [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 27 (4): 219-241.
- [19] 赵兵建, 孟天华, 王亮. 基于 NTP 的时间同步技术与应用研究 [J]. 医疗卫生装备, 2016, 37 (12): 55-60.
- [20] 何万里, 隋江华, 任光. 时钟同步算法的分析和比较 [J]. 计算机工程与应用, 2004 (34): 51-53.
- [21] 戴晓晨. 时间触发分布式系统容错内部时钟同步算法研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2018.