

# 基于小波变换的船舶电力系统绝缘监测方法

姜帅全 朱志宇

(江苏科技大学电子信息学院 江苏 镇江 212000)

**摘要** 为了迅速发现船舶电力系统中容性设备绝缘故障,有必要对其绝缘情况进行检测。船舶容性设备中的绝缘介质容易老化,其绝缘性能也会受到影响。介质损耗因数  $\tan \delta$  是反映容性设备绝缘情况的重要参数。基于相关函数分析提出一种以小波为基础滤除高次谐波的方法,用于解决船舶交流电网中高次谐波会较大影响介质损耗角测量方法的问题。选择合适的小波函数滤除高次谐波用于小波变换,能够消除谐波的影响,提高测量精度。介质损耗角测量方法经过改进后具有更好的绝缘监测准确性。

**关键词** 船舶电力系统 绝缘监测 介质损耗因数 小波变换 相关函数分析法

中图分类号 TP301.6

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2023.02.009

## AN INSULATION MONITORING METHOD OF SHIP POWER SYSTEM BASED ON WAVELET TRANSFORM

Jiang Shuaiquan Zhu Zhiyu

(Electronic Information School, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, Jiangsu, China)

**Abstract** It is very necessary to monitor the insulation of the capacitive equipment in the ship power system in order to discover its insulation failure in time. The insulating medium in the capacitive equipment is susceptible to aging, which affects its insulation performance. The dielectric loss factor  $\tan \delta$  is an important parameter reflecting the insulation of capacitive equipment. According to the correlation function analysis, a method based on wavelet to filter out higher harmonics is proposed, which is used to solve the problem that higher harmonics in AC power network will greatly affect the measurement method of dielectric loss angle. Choosing the appropriate wavelet function to filter out the high order harmonics can eliminate the influence of harmonics and improve the measurement accuracy. The measurement method of dielectric loss angle has better insulation monitoring accuracy after improvement.

**Keywords** Ship power system Insulation monitoring Dielectric loss factor Wavelet transform Correlation function analysis

## 0 引言

在船舶作业过程中,由于自然环境和作业环境的影响,例如化学腐蚀、机械损耗等,容性设备中的绝缘介质容易老化,其绝缘性能也会受到影响。介质损耗因数  $\tan \delta$  可作为重要参数反映容性设备绝缘情况。介质损耗角度是指变压器电场作用下的电流和电压之间的损耗角度,称为介质损耗角度  $\delta$ ,它可以反映电气设备的绝缘情况。但是,设备的绝缘情况在实践过程

中由  $\tan \delta$  反映,即公共介质损耗角的切线。在实际作业过程中,由于交变电场的作用,绝缘材料中的内部自由粒子会产生介质极化和导电现象。当电流延迟时,材料内能量损失以热量形式释放。由于热能,绝缘材料在较长的工作时间内可能老化并降低绝缘能力。在这种情况下,船舶电力系统可能面临某些安全风险,必须及时进行绝缘检测以避免故障。

介质损耗角正切值也就是介质损耗因数,其定义:

$$\tan \delta = \frac{P_{\text{测}}}{Q_{\text{测}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P_{\text{测}}$ 为被测试品的有功功率; $Q_{\text{测}}$ 为被测试品的无功功率。

介质损耗角是反映高压电气设备绝缘性能的一项重要指标。更改的介质损耗角度可以反映绝缘缺陷。绝缘监测对于船舶电力系统的安全性及可靠性具有重大的价值。

## 1 测量介质损耗角的方法

电气设备介质损耗系数( $\tan \delta$ )检测方法包括两种,一种基于硬件,另一种基于软件。

### 1.1 以硬件为主的测量方法

#### 1.1.1 过零鉴相法

过零鉴相法用来计算  $\tan \delta$ 。在实践中,由于硬件电路可能具有影响检测精度的固有零不平衡,因此通常可以通过在检测周期中将波形向上移至零以上两次来克服这种不平衡。过零鉴相法的缺点是受到波形畸变的严重影响,要求零点精度高,此外过零鉴相法对电网谐波的影响较大<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.2 过零点电压比较法

对于电压幅度值相同、频率相同和相位角度稍有不同的正弦电压适用于过零点电压比较法。也就是说,可以通过两个高于零的正弦波之间的电压差异来唯一确定大小和频率相同的两个正弦电压之间的相位差异。过零点电压比较法的优势是不需要严格的 A/D 转换,且具有良好的抗干扰能力。

### 1.2 以软件为主的测量方法

介质损耗角度测量方法以硬件为主,仍存在着一些不足,例如电路的硬件要求高,易受站点环境中的电磁干扰和地面电网的谐波干扰。软件分析方法是目前常用的测试方法,其优点是灵活实用,便于信号处理,消除谐波产生的误差,克服了环境对硬件测量方法有较大影响的缺陷<sup>[2]</sup>。谐波分析、相关系数法和正弦波合法拟合法是主要的软件分析方法。由于不严格要求取样点数的相关系数分析方法的优点,选择相关系数分析方法作为介质损耗因素检测算法。

## 2 小波变换在绝缘检测中的应用

监测船舶电力系统绝缘情况时,因为船舶电力系统非常复杂,必须在收集过程中纳入环境电磁干扰和频繁出现的严重干扰信号(闪电脉冲、操作冲击等)。极端情况下,当实际电流信号被干扰信号淹没时,监测跟踪信号也更加困难。因此,从高度扰动环境中提取

脆弱和有用的信号对于进一步处理至关重要,这对介质损耗系数的测量的准确性有直接影响<sup>[3]</sup>。在实践中,减少噪声不仅需要研究信号捕捉技术和设计信号电路,更重要的是还需要找到最好的方法来减少信号捕捉所产生的噪声。传统的过滤器是最常用的方法之一,但消除噪声往往会扭曲所需的信号。此外,傅里叶变换也是数字信号处理的一个重要方法,特别是当它被用于处理信号时,效果良好。但是,傅里叶变换不能用于局部分析。短期傅里叶变换在处理非光滑信号时,通过在傅里叶变换中引入窗口函数,并通过窗口平移可局部分析信号。

小波变换的特点是固定的窗口空间和可变的窗口形状,能够在时间和空间上分析信号,克服传统的傅里叶变换的局限性<sup>[8]</sup>。这种转换原则是傅里叶变换后的又一个重大突破,可以通过传统的傅里叶变换来处理所有的问题。小波变换对某一时刻的频率分布起到决定作用,混合信号由于可将不同频率的信号分为不同频率的信号块,所以具有消除噪声的优点。高次谐波存在于船舶交流电网中,介质损耗角正切值  $\tan \delta$  的准确测量会因为高次谐波存在而受到影响。小波变化很少受频率偏移的影响,通过良好的噪声消除功能和频率跟踪功能。因此本文选择小波变换,在船舶交流电网中过滤谐波,获得正确的介质损失切值  $\tan \delta$ ,及时对设备的绝缘情况进行检测,以便船舶电力系统的安全运行得到保证<sup>[4]</sup>。

### 2.1 小波变换的基本理论

小波变换能够很好地处理主要频率为低频信息的信号,与此不同的是小波包变换能够对信号的高频部分做更精细的分解。小波包的定义如下:

给定正交尺度函数  $\varphi(t)$  和小波函数  $\psi(t)$ , 其二尺度关系为:

$$\begin{cases} \varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2t - k) \\ \psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k) \end{cases} \quad (2)$$

进一步推广二尺度方程,定义递推关系:

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k w_n(2t - k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k w_n(2t - k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h_k$ 、 $g_k$ 分别为对应的尺度函数  $\varphi(t)$  和小波函数  $\psi(t)$  的滤波器系数。当  $n=0$  时,  $w_0(t) = \varphi(t)$ ,  $w_1(t) = \psi(t)$ 。小波包具有平移正交性与  $w_{2n}$  和  $w_{2n+1}$  正交的关系。

目前的小波库中有许多小波包,不同的小波包的适用情况和性质均不同,在处理不同的问题时应选取

合适的小波包。小波母函数和最优小波包基的选取在处理信号时非常关键,两个选取均合适会达到很好的处理效果,有利于下一步运算的进行<sup>[5]</sup>。

因船舶电网的高次谐波分量会影响介质损耗角的测量精度,若要准确进行绝缘检测则需提取出基波信号,滤除高次谐波。采用尺度分析的小波包变换可以在信号的不同位置得到最佳时域分辨率和频域分辨率,实现电压电流基波信号与高次谐波信号的分离,是一种有效的分析工具。

基于小波包变换谐波检测是将船舶岸电电网中含有高次谐波的电压和电流经 A/D 采样将信号离散化,再选取合适的小波包,将基波信号与各高次谐波分解到不同频带的子频带信号中,将检测出的电压电流基波信号体现在子频带区域中,其余的高次谐波则在其余子频带区域体现。小波包分解与重构得到基波分量的方法是对基波分量的子频带区域重构,达到基波信号与谐波信号的分离<sup>[6]</sup>。

小波包函数可以用来表示电流信号均方根值。 $v(t)$ 、 $i(t)$  是电压、电流的模拟信号, $v(n)$ 、 $i(n)$  为电压、电流的数字信号,其中  $n=0,1,2,\dots,2^{N-1}$ 。

由以上理论,可以将船舶电网中的电压、电流信号展开为小波基函数权值相加的线性组合。以电压信号为例,可以将电压信号展开如下:

$$v(t) = \sum_{i=0}^{2^{j-1}-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^{2i}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^{j-1}-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^{2i+1}(k) \psi_{j,k}^{2i+1}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^0(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^i(k) \psi_{j,k}^i(t) \quad (4)$$

式中: $d_j^i(k)$  为尺度函数系数;电压信号  $v(t)$  的小波系数为  $d_j^i(k)$  ( $i>0$ )。

船舶电力系统中的电压信号  $V_{\text{RMS}}$  的值在第  $j$  层分解可以用小波变换系数 (Wavelet Transform Coefficients, WTCs)。

$$\int v(t)^2 dt = \int \left[ \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^0(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^i(k) \psi_{j,k}^i(t) \right]^2 dt = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^0(k)]^2 \int [\varphi_{j,k}(t)]^2 dt + \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)]^2 \int [\psi_{j,k}^i(t)]^2 dt + 2 \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^0(k) d_j^i(k) \int \varphi_{j,k}(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (5)$$

式(6)可近似如下:

$$\int v(t)^2 dt = \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)]^2 \quad (6)$$

电压  $v(t)$  的 RMS 值表示如下:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} v(n)^2} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)]^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{2^{j-1}} (V_j^i)^2} \quad (7)$$

式中: $V_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)]^2}$ ;  $V_j^i$  是电压在  $j$  层第  $i$  个节点频带电压的 RMS。同理,电流  $i(t)$  的 RMS 值表示如下:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i(n)^2} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^{*i}(k)]^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{2^{j-1}} (I_j^i)^2} \quad (8)$$

式中: $I_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^{*i}(k)]^2}$ ,  $d_j^{*i}(k)$  是电流  $i(n)$  的 WTCs,  $I_j^i$  是电流在  $j$  层第  $i$  个节点频带的 RMS。

## 2.2 基于 Daubechies (dbN) 小波分析

小波 (Daubechies) 简称为 dbN, 其阶数用  $N$  表示, 是由小波分析学者 Daubechies 提出的。当  $N=1$  时 dbN 具有对称性,  $N \neq 1$  时则不具备对称性的性质。此外, 当  $N=1$  时 dbN 表达式可以确定,  $N \neq 1$  时转换函数  $h$  的平方模可明确, 但表达式不可明确。

令  $P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k$ , 其中  $C_k^{N-1+k}$  为二项式系数, 则有:

$$|m_0(\omega)|^2 = \left( \cos^2 \frac{\omega}{2} \right)^2 P \left( \sin^2 \frac{\omega}{2} \right) \quad (9)$$

式中:  $m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-j k \omega}$ 。

Daubechies 小波有以下特点: 可以由所谓“尺度函数”  $\varphi(t)$  求出小波函数  $\psi(t)$ , 尺度函数  $\varphi(t)$  是一种长度度有限的低通函数, 支撑域在  $t=0 \sim (2N-1)$  范围内。常用于电能质量分析的 db4 小波函数的波形图和滤波器如图 1 和图 2 所示。

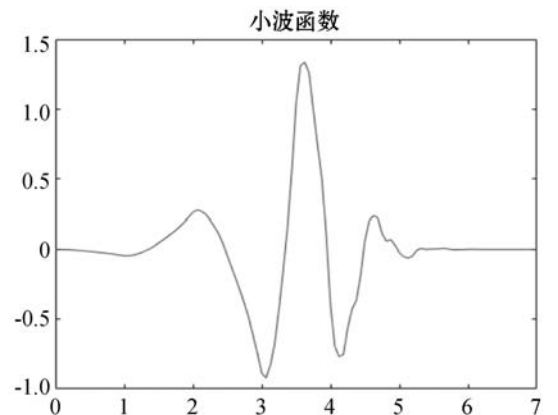


图 1 db4 小波函数

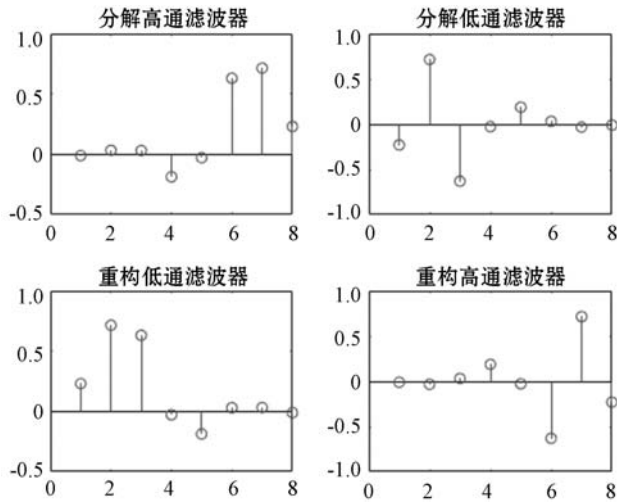


图 2 db4 小波函数小波滤波器

### 3 基于小波和相关函数分析的介损测量方法

#### 3.1 相关函数介损测量算法

所谓相关函数法是根据船舶交流电网中的电压  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$  和电流  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$  的自相关函数和互相关函数获得船舶岸电系统中设备的介损角的。其中电压电流的自相关函数与互相关函数如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} R_i(0) = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [I_m \sin(\omega t + \varphi_i)]^2 dt = \frac{I_m^2}{2} \\ R_u(0) = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [U_m \sin(\omega t + \varphi_u)]^2 dt = \frac{U_m^2}{2} \\ R_{iu}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [I_m \sin(\omega t + \varphi_i) U_m \sin(\omega t + \varphi_u)] dt = \frac{I_m U_m}{2} \cos(\varphi_u - \varphi_i) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $T$  为整周期,  $N$  为  $T$  内的采样点数。在实际算法中, 相关算法的离散时间表达式如下:

$$\begin{cases} R_i(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) i(n) \\ R_u(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) u(n) \\ R_{iu}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) u(n) \end{cases} \quad (11)$$

介损角为:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - (\varphi_i - \varphi_u) = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{R_{iu}(0)}{\sqrt{R_i(0) R_u(0)}} \quad (12)$$

用相关函数法求取船舶电力系统中设备的介损值具有算法简单的优点, 但由于船舶岸电电网中存在直

流分量和高次谐波, 因此会不可避免地影响计算准确度。在此可将直流分量和谐波表示如下  $A(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{2n-1} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k)$ ,  $\omega$  为电压、电流的基波频率, (在船舶电力系统中基波为 50 Hz 或 60 Hz),  $A_k$  ( $k = 0, 1, 3, \dots, 2N - 1$ ) 为各分量幅值。其中各分量初相位为  $k_\varphi$  ( $k = 0, 1, 3, \dots, 2N - 1$ )。若要想获得较高的准确度, 在用相关函数分析法进行介质损耗角计算前应先滤除高次谐波和直流分量, 提取出电压电流的基波, 进而进行相关计算。

#### 3.2 对相关函数介损测量的改进

以基波频率为 60 Hz, 电压为 440 V 的低压船舶电力系统为例, 谐波主要是  $2n + 1$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) 等奇数次谐波, 考虑到谐波衰减并且频率越高衰减越快, 现将电力系统中基波电压及谐波信号设置如下:

基波电压信号为:

$$U_1 = 440 \times \sin(120 \times \pi \times t) \quad (13)$$

三次谐波为:

$$U_3 = 0.05 \times 440 \times \exp(-15 \times t) \times \sin(360 \times \pi \times t + \pi/3) \quad (14)$$

五次谐波为:

$$U_5 = 0.03 \times 440 \times \exp(-20 \times t) \times \sin(600 \times \pi \times t + \pi/5) \quad (15)$$

七次谐波为:

$$U_7 = 0.03 \times 440 \times \exp(10 \times t) \times \sin(800 \times \pi \times t + \pi/4) \quad (16)$$

九次谐波为:

$$U_9 = 0.02 \times 440 \times \exp(5 \times t) \times \sin(1080 \times \pi \times t + \pi/6) \quad (17)$$

十一次谐波为:

$$U_{11} = 0.01 \times 440 \times \exp(-1.5 \times t) \times \sin(1320 \times \pi \times t + \pi/4) \quad (18)$$

原始电压信号图与幅频特性图分别如图 3 和图 4 所示。

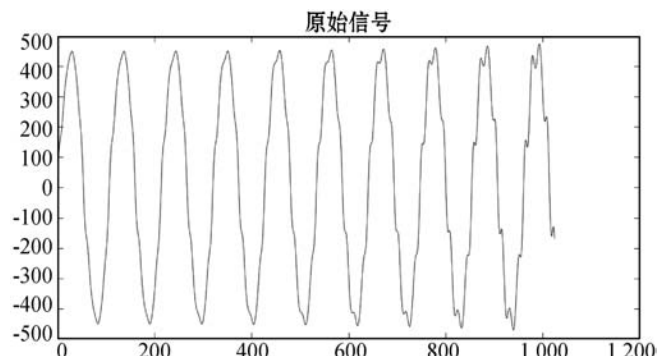


图 3 原始电压信号

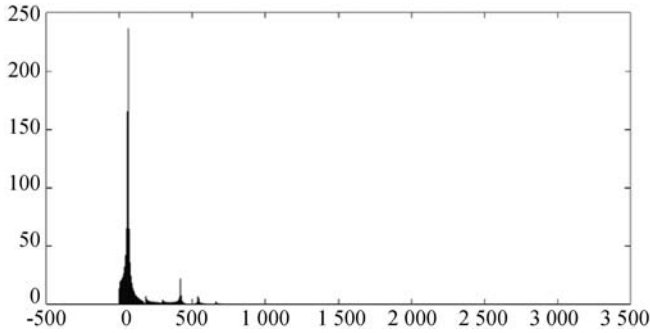


图4 原始电压信号幅频特性图

以此基波频率为 60 Hz 的船舶电力系统为例,船舶交流电网中有 3~11 次奇次谐波,需要将以上谐波全部滤除得到基波 60 Hz 的信号。设模拟采样频率为 6 400 Hz,可以还原到频率为 3 200 Hz 的信号,对信号进行第一次 Mallet 分解可以还原的信号分为低频概貌(0~1 600 Hz)和高频细节(0~3 200 Hz),再将此低频概貌信号进行一次 Mallet 分解依旧可以得到低频概貌(0~800 Hz)和高频细节(800~1 600 Hz)以此类推,进行 5 次 Mallet 分解可以滤除高次谐波得到 60 Hz 的基频电流信号<sup>[7]</sup>。示意图如图 5 所示。

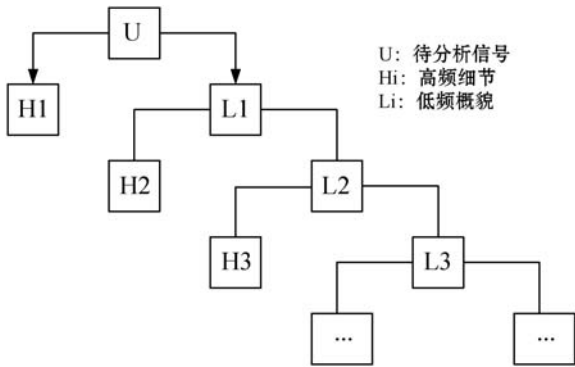


图5 Mallet 分解示意图

以 6 400 Hz 的采样频率,用 Mallet 分解进行 5 次分解,五次分解后的低频概貌信号中含有 60 Hz 的基波电流信号,然后再经过 5 次小波重构,就可得到船舶交流电网中的电压基波信号。在小波重构的过程中,为了保证重构信号与真实信号之间的准确性、减少失真,即保证基波信号与谐波信号之间完全分离,则要求小波变换中使用的小波基具有以下特性:

- ① 紧支性。保证检测的精度。
- ② 正交性。使得基波谐波能够分离。
- ③ 高阶消失矩。使计算量有限。
- ④ 对称性。避免信号失真。

本文选择 dbN 小波包,  $N$  取 14,即选取的小波具有十四阶消失矩,将前文中的原始电压信号进行小波去噪,即对原始信号进行 5 次分解和重构后得到船舶电力系统中的 60 Hz 基波电压信号。原始信号和滤波后信号如图 6 所示。

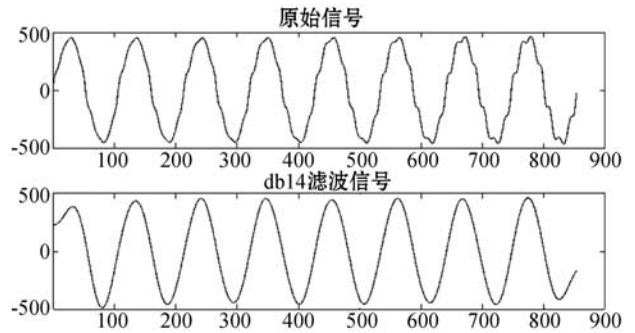


图6 db14 滤波效果图

重构后的基波信号的幅频特性图如图 7 所示。

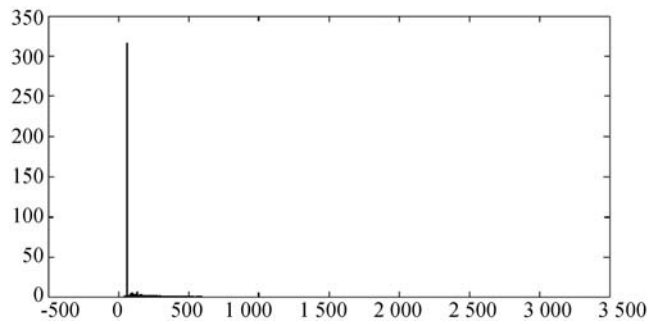


图7 重构低频信号的幅频特性

### 4 实验与结果分析

本文使用 MATLAB 进行基于相关函数分析法和 小波变换去噪的介质损耗角测量仿真实验,电压和电流设置如下:

$$u(t) = \sin(\omega t + \varphi_{u1}) + 0.02\sin(3\omega t + \varphi_{u3}) + 0.0125\sin(5\omega t + \varphi_{u5}) + 0.0075\sin(7\omega t + \varphi_{u7}) \quad (19)$$

$$i(t) = \sin\left(\omega t + \varphi_{i1} + \frac{\pi}{2} - \delta\right) + 0.02\sin(3\omega t + \varphi_{i3}) + 0.0125\sin(5\omega t + \varphi_{i5}) + 0.0075\sin(7\omega t + \varphi_{i7}) \quad (20)$$

式中:  $\omega = 2\pi f, f = 60$  Hz;  $\varphi_{u3}, \varphi_{u5}, \varphi_{u7}, \varphi_{i3}, \varphi_{i5}, \varphi_{i7}$  为各谐波的相位角,  $\varphi_{u1}, \varphi_{i1}$  为基波电压、电流信号的初相角。本文通过仿真对比了过零鉴相法和经小波去噪后再使用相关分析法计算的各介质损耗角,其中,过零鉴相法的 Simulink 建模如图 8 所示。

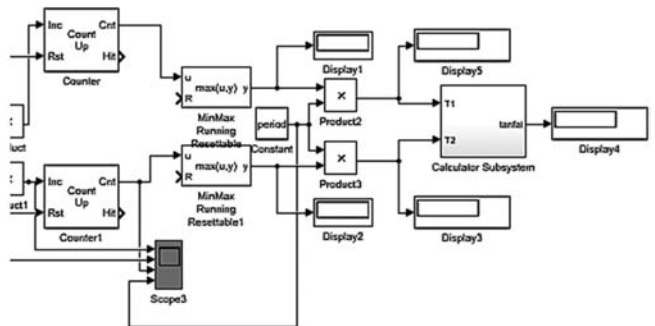


图8 过零鉴相法 Simulink 模型图

实验结果对比如表 1 和表 2 所示,结果表明经小波变换去噪后再使用相关分析法计算的各介质损耗角的测量方法绝对误差和相对误差都比已有软件检测方法(谐波分析法)好,具有更高的测量精度。

表 1  $\delta$  角变化时过零鉴相法计算结果

实际值/ $10^{-2}$	测量值/ $10^{-2}$	绝对误差/ $10^{-2}$	相对误差/%
0.1	0.084	0.016	19.1
0.2	0.219	0.019	8.6
0.3	0.280	0.020	7.1
0.4	0.437	0.037	8.4
0.5	0.569	0.069	12.1
0.6	0.675	0.075	11.1
0.7	0.792	0.092	11.6
0.8	0.713	0.087	12.2
0.9	0.978	0.078	8

表 2  $\delta$  角变化时改进相关系数分析法计算结果

实际值/ $10^{-2}$	测量值/ $10^{-2}$	绝对误差/ $10^{-2}$	相对误差/%
0.1	0.094	0.006	6.38
0.2	0.210	0.010	4.7
0.3	0.290	0.010	3.4
0.4	0.389	0.011	2.8
0.5	0.523	0.023	4.39
0.6	0.621	0.021	3.38
0.7	0.684	0.016	2.3
0.8	0.817	0.017	2.08
0.9	0.939	0.039	4.15

## 5 结 语

本文在分析了介质损耗角的测量方法及影响介质损耗角测量准确度的因素后,使用小波变换,选取合适的小波基对原始电压电流信号进行分解和重构,滤除了船舶电网中的谐波,提取出电压电流的基波,选取相关函数分析法通过基波电压电流信号的自相关函数和互相关函数进行介质损耗角的计算。实验表明用此方法计算的绝缘介质损耗角准确率较高,能更好地监测船舶电力系统中的容性设备绝缘情况,对绝缘故障能够及时发现和处理。本文所提出算法能更好地完成船舶电力系统的绝缘监测工作。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 庞浩,李东霞,俎云霄等.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):49-54.
- [ 2 ] 龙锋,王富龙等.基于 DSP 的容性设备介质损耗因素在线监测方法[J].电力系统自动化,2004,28(19):71-74.
- [ 3 ] 刘菲,任章,李青东.基于小波方差的 MEMS IMU 随机误差模型间接估计方法[J].中国惯性技术学报,2016,24(1):77-82.
- [ 4 ] 葛哲学,沙威.小波分析理论与 MATLAB R2007 实现[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [ 5 ] Pan H, Siu W C, Law N F. A fast and low memory image coding algorithm based on lifting wavelet transform and modified SPIHT[J]. Signal Processing,2008,23(3):146-161.
- [ 6 ] Rabbani H, Vafadust M. Image/video denoising based on a mixture of Laplace distributions with local parameters in multidimensional complex wavelet domain[J]. Signal Processing,2007,88(1):158-173.
- [ 7 ] 张锐,赵明伟.关于供电系统电网谐波优化检测仿真[J].计算机仿真,2019,36(3):142-146.
- [ 8 ] 杨红强.混沌振子与小波变换在应答器 2FSK 信号解调中的应用研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- ~~~~~
- (上接第 11 页)
- [ 12 ] 陈莹,孙晓波,邢建春,等.任务关键系统的时间约束验证与最优路径分析[J].计算机工程,2018,44(5):60-65,77.
- [ 13 ] Fabra J, Castro V D, Álvarez P. Automatic execute in of business process models: Exploiting the benefits of Model-driven Engineering approaches[J]. The Journal of Systems and Software, 2012,85(3):607-625.
- [ 14 ] Dijkman R M, Dumas M, Ouyang C. Semantics and analysis of business process models in BPMN[J]. Information and Software Technology,2008,50(12):1281-1294.
- [ 15 ] Yang N H, Yu H Q, Sun H, et al. Modeling UML sequence diagrams using extended Petri nets[J]. Telecommunication Systems, 2012,51:147-158.
- [ 16 ] Philippi S. Automatic code generation from high-level Petri-Nets for model driven systems engineering[J]. Journal of Systems and Software, 2006,79(10):1444-1455.
- [ 17 ] Billington J, Christensen S, Van Hee K, et al. The Petri net markup language: Concepts, technology, and tools[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets. Springer,2003:483-505.
- [ 18 ] Jünger M, Kindler E, Weber M. The Petri net markup language[R]. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik,2000.
- [ 19 ] Aalst W M P V D, Hofstede A H M T. YAWL: Yet another workflow language[J]. Information Systems,2005,30(4):245-275.
- [ 20 ] ePNK[EB/OL]. [2020-06-22]. <http://www.imm.dtu.dk/~ekki/projects/ePNK/index.shtml>.
- [ 21 ] 李宗花,叶正伟.业务目标模型与业务场景模型的语义一致性分析[J].计算机工程,2019,45(12):308-313.