

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211122

# 基于 Prony 算法-准同步序列的超低频介损测量方法

焦裕鹏<sup>1</sup> 王 玮<sup>1</sup> 贾明娜<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255049; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司 淄博 255087)

**摘要:** 超低频介质损耗因数测量方法,由于测量信号频率低导致采样时间长,采集数据量大,且在非同步采样时,快速傅里叶变换存在频谱泄露和栅栏效应,影响对介质损耗因数的精确测量。为降低测量信号采样时间和采集数据量,以及非同步采样时频谱泄露和栅栏效应,提出一种基于 Prony 算法-准同步序列的超低频介损测量方法,利用 Prony 算法并结合数据辨识方法,对采样电压信号的基波频率进行预估,通过 Newton 插值算法,实现对电压和电流信号的准同步插值重构,获得采样信号的准同步序列,由 FFT 及介损等效电路模型,对准同步序列进行求解,实现对超低频介质损耗因数的求取。在频率波动、谐波含量变化、介损角变化和不同信噪比的噪声下测量介质损耗因数。仿真结果表明,该方法在软件上实现了准同步采样,有效降低了栅栏效应和频谱泄露对介质损耗因数测量的影响,并且采样时间短,采集数据量少,测量精度高,适用于对超低频介质损耗因数的精确测量。

**关键词:** 超低频; Prony 算法; 数据辨识; Newton 插值; 准同步序列; FFT; 介质损耗因数

**中图分类号:** TM934.32 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Measurement of ultra-low frequency dielectric loss based on Prony algorithm and quasi synchronous sequence

Jiao Yupeng<sup>1</sup> Wang Wei<sup>1</sup> Jia Mingna<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

**Abstract:** For the ultra-low frequency dielectric loss factor measurement method, due to the low frequency of the measured signal, the sampling time is long and the amount of data collected is large. In addition, in the case of asynchronous sampling, the FFT has spectrum leakage and fence effect, which affects the accurate measurement of the dielectric loss factor. In order to reduce the sampling time and the amount of data collected, as well as the spectrum leakage and fence effect during asynchronous sampling, an ultra-low frequency dielectric loss measurement method based on Prony algorithm quasi synchronous sequence is proposed. Prony algorithm and data identification method are used to estimate the fundamental frequency of the sampled voltage signal, and Newton interpolation algorithm is used to realize the quasi synchronous interpolation reconstruction of voltage and current signals, The quasi synchronous sequence of the sampled signal is obtained, and the quasi synchronous sequence is solved by FFT and dielectric loss equivalent circuit model to obtain the ultra-low frequency dielectric loss factor. The dielectric loss factor is measured under the conditions of frequency fluctuation, harmonic content change, dielectric loss angle change and noise with different signal-to-noise ratio. The simulation results show that the method realizes quasi synchronous sampling in software, effectively reduces the influence of fence effect and spectrum leakage on dielectric loss factor measurement, and is suitable for accurate measurement of ultra-low frequency dielectric loss factor due to short sampling time, small amount of collected data and high measurement accuracy.

**Keywords:** ultra-low frequency; Prony algorithm; data identification; newton interpolation; quasi synchronous sequence; FFT; dielectric loss factor

## 0 引 言

在电力系统中,电力电缆被广泛应用,由于电缆在长时

间运行时,会受到高温、高电压、机械外力和环境因素的影响,导致其绝缘性能降低<sup>[1-2]</sup>,对电力系统的安全稳定运行产生影响。介质损耗因数  $\tan\delta$  是衡量电缆绝缘性能的重

要参数<sup>[3]</sup>,对介质损耗因数的精确测量,可以准确判断电缆的绝缘性能,为电力系统的安全稳定运行提供重要保障<sup>[4]</sup>。

近几年,超低频(0.1 Hz)介损测量方法,在电缆中获得广泛应用,通过测量超低频介损因数,并结合超低频介损诊断标准,实现对电缆绝缘性能的判断<sup>[5]</sup>。对于介损因数的测量有硬件法和软件法,硬件法易受噪声干扰,抗干扰能力差;软件法抗干扰能力强,对硬件电路要求低,广泛应用于介损因数测量。

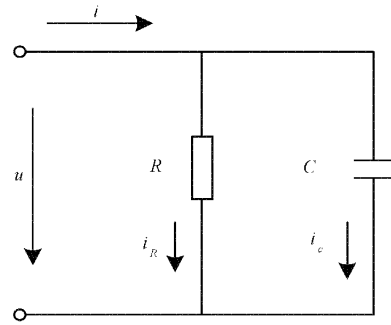
软件测量方法有高阶正弦拟合法,相关函数法,正交滤波法和快速傅里叶变换法(fast Fourier transform, FFT)等。由于 FFT,抗干扰能力强,计算简单,在介损因数测量中广泛应用<sup>[6]</sup>,但在非同步采样时存在频谱泄露和栅栏效应<sup>[7-9]</sup>,影响对超低频介损因数的精确测量。因此,国内外许多研究者提出基于 Hanning 窗、Nuttall 窗、Blackman 窗、三角自卷积窗、Nuttall 自卷积窗等加窗插值傅里叶变换的方法<sup>[10-13]</sup>,来抑制非同步采样产生的频谱泄露和栅栏效应。通过对加窗插值法的研究表明:该方法在一定程度上提高了测量精度,但易受窗函数类型以及窗函数主、旁瓣性能的影响;谱线插值法需要借助上位机先求解出拟合系数,在将系数导入到测量设备中进行使用,导致其过程繁琐;在超低频测量时由于信号频率低,会使采样时间长,采集数据量大。文献[14]提出基于采样序列重构方法的介损因数测量,无需采用加窗插值法降低了计算复杂度,但由于采用准同步采样算法,使其频率分辨率有限,对邻近的频率成分无法检测<sup>[15]</sup>。

针对上述分析,本文提出一种基于 Prony 算法-准同步序列的介损测量方法,用于超低频介损因数测量。该方法利用 Prony 算法<sup>[16-18]</sup>并结合数据辨识方法对采样电压信号的基波频率进行预估,通过 Newton 插值算法<sup>[19]</sup>对电压和电流信号进行准同步插值重构,获得采样信号的准同步序列<sup>[20]</sup>,然后通过 FFT,对准同步序列进行频域分析,并结合介损等效电路模型求解,获得超低频介损因数。相对于加窗插值傅里叶变换法和时域准同步采样法,本文方法在软件上实现了同步采样,能有效抑制非同步采样产生的频谱泄露和栅栏效应影响,且采样时间短,采集数据量少,并能对邻近频率成分进行辨识,实现对基波频率的准确预估。在频率波动、谐波含量变化、介损角变化和不同信噪比的噪声下进行仿真实验。仿真结果表明,该方法能够对超低频介损因数的精确测量。

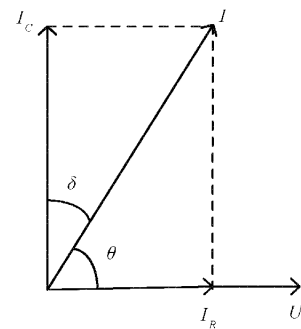
## 1 介损因数测量原理

电力电缆绝缘介质的简化等效电路模型,可看成一个 RC 并联电路模型,如图 1 所示。

图 1 中,  $R$  为绝缘介质等效电阻,  $C$  为绝缘介质等效电容,  $\theta$  为绝缘介质的功率因数角,  $\delta$  为绝缘介质的介损角。根据绝缘介质等效电路模型以及相量图,可以得到绝缘介质的介损因数计算公式为:



(a) 并联电路模型



(b) RC 并联电路相量图

图 1 电缆绝缘介质等效电路模型

$$\tan\delta = \tan\left(\frac{\pi}{2} - |\theta_i - \theta_u|\right) = \frac{1}{\omega RC} \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$  为电流基波相位;  $\theta_u$  为电压基波相位;  $\omega$  为角频率。

## 2 基本算法

### 2.1 Prony 算法

Prony 算法是使用一组复指数函数来拟合等间隔的采样数据。设  $N$  个采样数据为  $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ , 则由式(2)拟合采样数据, 记为  $\hat{x}(n)$ 。

$$\hat{x}(n) = b_1 e^{\beta_1 n} + b_2 e^{\beta_2 n} + \dots + b_p e^{\beta_p n} = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad (2)$$

式中:  $p$  为模型的阶数;  $n = 0, 1, \dots, N-1$  为采样点数;  $b_i$  和  $e^{\beta_i} = z_i$  均为复数, 表达式分别为:

$$\begin{cases} b_i = A_i e^{j\theta_i} \\ z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A_i$  为振幅;  $f_i$  为振荡频率;  $\theta_i$  为相位;  $\Delta t$  为采样间隔;  $\alpha_i$  为衰减因子。

为保证拟合信号  $\hat{x}(n)$  尽可能逼近原始信号  $x(n)$ , 采用平方误差  $\epsilon$  最小作为目标函数, 如式(4)所示。

$$\text{mine} = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (4)$$

为使式(4)最小, 求参数  $A_i, \theta_i, \alpha_i, f_i$  时采用最小二乘法。若直接求解非线性最小二乘问题是非常困难, 通过构

造常系数线性差分方程对参数进行求解,如式(5)所示。

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i) \quad (5)$$

式中:  $p \leq n \leq N-1$ 。

式(2)由欧拉公式,可得:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i e^{z_i n} \cos(2\pi f_i \Delta t n + \theta_i) \quad (6)$$

由式(6)可知,只需解得  $b_i$  和  $z_i$  就能用  $p$  个具有  $\theta_i, f_i, A_i$  和  $\alpha_i$  的余弦量来拟合原始数据。式(6)是常系数线性差分法方程式(5)的齐次解。

设原始数据  $x(n)$  与拟合近似值  $\hat{x}(n)$  的误差为  $e(n)$ , 如式(7)所示。

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

由式(5)和(7)可得:

$$x(n) = - \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) + u(n) \quad (8)$$

式中:  $u(n) = \sum_{i=0}^p a_i e(n-i)$ 。

对式(8)使用奇异值-最小二乘法计算,可获得特征方程系数  $a_i$ , 将  $a_i$  代入式(9)中,对多项式求根得到参数  $z_i$ 。

$$\sum_{i=0}^p a_i z^p = 0 \quad (9)$$

由式(2)可得矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_n^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{x}(1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

由最小二乘法求解式(10),得到参数  $b_i$ 。由参数  $z_i$  和  $b_i$  可得:

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ f_i = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(z_i)}{\text{Re}(z_i)} \right] / 2\pi \Delta t \\ \theta_i = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \right] \\ \alpha_i = \ln |z_i| / \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, p$ 。

### 2.2 数据辨识

若测量信号中含有噪声或选取的 Prony 算法模型阶数较大时,会出现虚假分量,影响对信号的辨识。虚假分量具有幅值较小,衰减较快的特性。

本文根据虚假分量的这两个特征,定义能量比例系数 ( $E_i$ ),对信号分量进行数据辨识。该方法具有运算量小,计算速度快的特点。

能量比例系数 ( $E_i$ ) 定义为:

$$E_i = \frac{A_i^2}{|\alpha_i|} \quad (12)$$

式中:  $A_i$  为各频率分量的幅值;  $\alpha_i$  为各频率分量的衰减因子;  $E_i$  为各频率分量的能量比例系数。

将信号分量根据能量比例系数进行从大到小排列。当能量比例系数迅速变小时,认定后面数据为虚假分量,其中最大能量比例系数所对应的信号分量为基波分量,根据这一原则辨识出信号中的基波频率。

### 2.3 准同步序列重构

在同步采样时,采样信号的周期  $T$  是采样周期  $T_s$  的整数倍,在非同步采样时不在具有整数倍,如式(13)所示。

$$T = NT_s + \Delta \quad (13)$$

式中:  $N$  为信号一个周期的采样点数,  $\Delta$  为非同步采样误差。

为实现准同步采样,由式(11)可得到准同步序列采样周期为:

$$\lambda = \frac{1}{Nf_0} \quad (14)$$

式中:  $f_0$  为测量信号基波频率。

对采样信号序列  $x(k)$ , 以准同步采样周期  $\lambda$ , 进行插值重构获得准同步序列  $x'(k_i)$ , 实现非同步采样序列的准同步化,如图 2 所示。

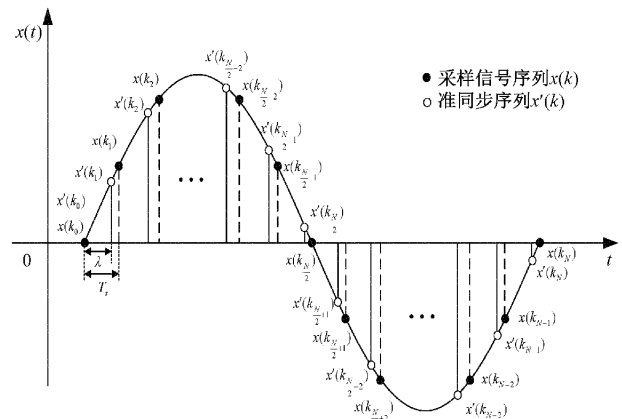


图 2 准同步序列重构

由于超低频测量信号采集的数据量比较大,为提高算法的运算速度,则选用计算复杂度小,计算速度快的 Newton 插值法,对采样序列进行插值重构。

Newton 插值法的多项式为:

$$N_m(k) = x(k_0) + x[k_0, k_1](k - k_0) + \dots + x[k_0, k_1, \dots, k_m](k - k_0) \dots (k - k_{m-1}) \quad (15)$$

式中:  $x[k_0, k_1, \dots, k_m]$  定义为采样信号采样序列  $x(k)$ , 在点  $k_i (i = 0, 1, 2, \dots, m)$  处的  $m$  阶差商,表达式为:

$$x[k_0, k_1, \dots, k_m] = \frac{x[k_0, k_1, \dots, k_{m-1}] - x[k_1, k_2, \dots, k_m]}{k_0 - k_m} \quad (16)$$

其中,  $x[k_0] = x(k_0)$ 。

## 2.4 基波相位及超低频介损损耗因数计算

对准同步序列,截取一个周期的数据,其截断表达式为:

$$x_N(n) = x'(n)w_R(n) \quad (17)$$

式中:  $x'(n)$  为准同步序列,  $w_R(n)$  为矩形窗,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

对截取的准同步序列进行 FFT,其变换后的频谱序列为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (18)$$

式中:  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , 为离散频谱线序号。

对信号的准同步序列进行频域分析,得到信号的基波相位为:

$$\varphi = \arg(X(k_0)) \quad (19)$$

通过上述分析可以获得电压和电流信号的基波相位  $\varphi_u, \varphi_i$ 。

由于信号的基波频率不一定符合 0.1 Hz,则先由式(1)获得信号在基波频率时的介质损耗因数,在通过式(20)实现由信号的基波频率获得超低频介质损耗因数  $\tan\delta_{0.1}$ 。

$$\tan\delta_{0.1} = \frac{1}{\omega_0 RC} \cdot \frac{f_0}{0.1} \quad (20)$$

式中:  $\omega_0 = 2\pi f_0$  为基波角频率。

## 3 本文算法描述

### 3.1 算法实现步骤

本文测量方法主要步骤为:预估信号基波频率、准同步序列重构、获取基波相位和超低频介质损耗因数计算。测量方法实现的具体步骤为:

1) 预估信号基波频率:利用 Prony 算法对离散化电压信号  $u(n)$  进行分析,通过数据辨识方法获得基波频率  $f_0$ 。

2) 准同步序列重构:根据获得的基波频率  $f_0$ ,采用 Newton 插值法,对电压和电流采样信号序列  $u(n), i(n)$  以采样周期  $\lambda$  进行插值重构,获得电压和电流信号的准同步采样序列  $x'_u(k), x'_i(n)$ 。

3) 获取基波相位:分别截取一个周期的电压和电流准同步序列  $x_{Nu}(n), x_{Ni}(n)$ ,采用 FFT 把时域信号转换到频域,通过频域分析得到电压和电流信号的基波相位  $\varphi_u, \varphi_i$ 。

4) 超低频介质损耗因数计算:根据介质损耗因数计算式(1)获得基波介质损耗因数,在通过式(20)实现由信号的基波频率获得超低频介质损耗因数  $\tan\delta_{0.1}$ 。

### 3.2 算法流程图

本文提出并建立的基于 Prony 算法-准同步序列的介损测量方法流程,如图 3 所示。

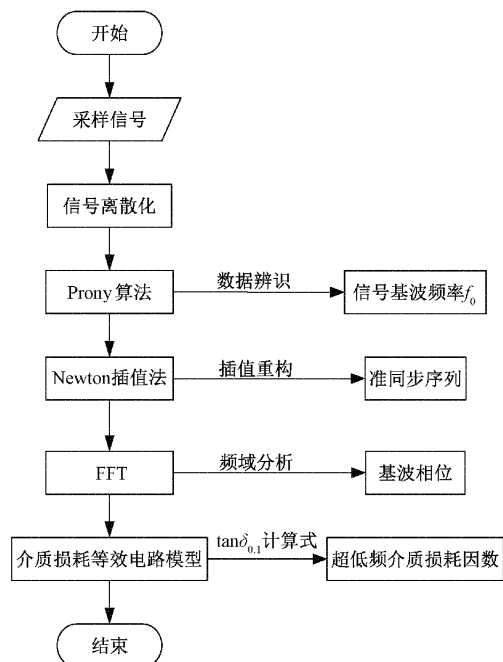


图 3 测量流程

## 4 算法仿真与分析

### 4.1 仿真模型建立

为验证本文算法,在超低频介质损耗因数测量时的可行性,通过仿真实验进行仿真验证。仿真电路采用文献[21]中的电路,如图 4 所示。

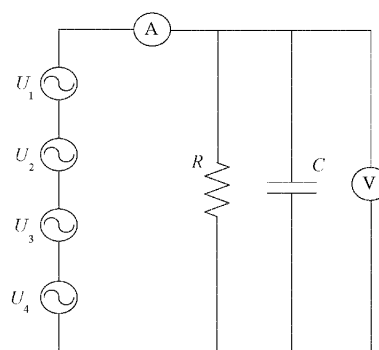


图 4 电路模型

图 4 中,  $R = 100 \text{ M}\Omega, C = 6\ 000 \text{ pF}, \tan\delta_{f=0.1} = 2.652\ 582\ 3$ 。

由于测量信号中含有谐波分量,则建立仿真电路的电压信号模型为:

$$u(t) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(2\pi m f + \varphi_m) \quad (21)$$

仿真电压信号的具体参数,如表 1 所示。测量信号的采样频率设置为 1 kHz。

表 1 电压信号参数

<i>m</i>	频率/Hz	幅值/V	相位/(°)
1	0.1	100	30
2	0.5	3	17
3	8	1.7	52
4	33	0.3	5

4.2 算法分析及参数设置

1) Prony 算法参数设置

由于 Prony 算法对采样信号处理时,若信号的采样时间过长,会导致无法辨识快速衰减的谐波分量;若采样时间过短,会造成丢失低频率的谐波分量,导致对信号的分析不准确<sup>[22]</sup>。因此,对信号的采样时间设置为大于信号中最低频率分量的 1~2 个周期。由于测量信号的频率会发生波动,最低频率为 0.06 Hz,则本文的采样时间设置为 35 s。

Prony 算法模型阶数选取较大时会降低算法的运算性能,太小时无法对信号准确辨识。由于辨识信号中,最高谐波分量的频率为  $f_{max} = 33$  Hz,最低谐波分量的频率  $f_{min} = 0.06$  Hz,则采用式(22)预估模型阶数  $p$ 。

定义模型阶数预估的计算式为:

$$p = \left\lceil \frac{f_{max}}{f_{min}} \right\rceil \quad (22)$$

式中:  $p$  为模型阶数,  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。

因此,对 Prony 算法模型阶数的预估为  $p = 550$ 。对模型阶数与频率辨识的误差关系进行仿真,仿真结果如图 5 所示。

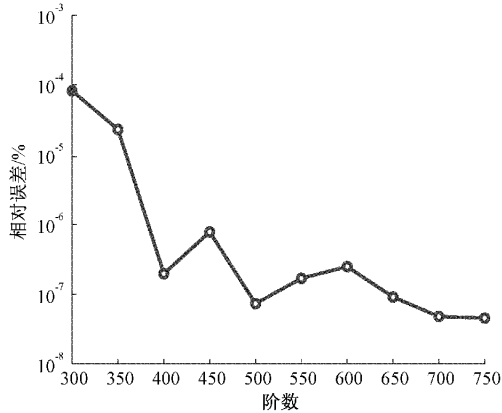


图 5 Prony 算法频率辨识误差

由图 5 可知,频率辨识相对误差,随模型阶数的增大总体上逐渐减小,但在增大模型阶数时,其运算量会相应增加。当选取模型阶数为  $p = 550$  时,频率辨识相对误差为  $1.1678 \times 10^{-7} \%$ ,满足对频率辨识要求,验证了对模型阶数预估方法的可行性。

2) Prony 算法仿真分析

由于介损测量信号的信噪比,最低取为 20 dB,则对信号在无噪声和信噪比为 20 dB 的两种极端情况下,对信号采用 Prony 算法后,主要数据辨识情况进行分析。信号仿

真结果,分别如表 2 和 3 所示。

表 2 无噪声信号数据分量辨识

频率/Hz	能量比例系数
0.1	$1.098 \times 10^{14}$
8	$1.356 \times 10^{11}$
0.5	$1.126 \times 10^{11}$
33	$2.815 \times 10^9$
33.937	$6.046 \times 10^{15}$
4.358	$5.084 \times 10^{-16}$

表 3 含噪声信号数据分量辨识

频率/Hz	能量比例系数
0.1009	$2.106 \times 10^5$
0	$1.271 \times 10^1$
160.565	$1.580 \times 10^3$
100.174	$9.717 \times 10^2$
161.665	$7.686 \times 10^2$
146.953	$6.347 \times 10^2$

根据表 2 中的数据可得,无噪声信号采用 Prony 算法后根据能量比例系数,能准确的辨识出信号的基波频率和所含谐波信号的频率,具有较高的准确性。根据表 3 中的数据可得,信噪比为 20 dB 的信号,采用 Prony 算法后也能较为准确的辨识出信号的基波频率。但由于信号中所含谐波分量小,噪声强度大,导致分析出,含噪信号中的主要频率分量,与信号中所含谐波分量不一致。要进一步提高 Prony 算法,对含噪声信号中所含谐波分量的分析,则在测量时需要采取降噪措施。由表 2 和 3 中的数据,进一步验证了模型阶数预估方法,对无噪声信号和含有噪声信号,能较为准确的预估出信号的基波频率。

3) 基波频率预估分析

由于超低频测量信号的频率不稳定性小于 3%,导致测量时信号的频率不一定符合 0.1 Hz。以电压信号频率为例,对算法的频率预估准确性进行仿真分析,采用基于 Nuttall 窗三谱线插值法<sup>[23]</sup>,基于汉宁窗插值法<sup>[24]</sup>,基于准同步采样法<sup>[25]</sup>和本文方法,用于对基波频率的预估,并将预估结果进行对比分析。基波频率预估误差对比结果,如图 6 所示。

由图 6 可知,本文方法对基波频率预估的准确性最高,基于准同步采样算法对基波频率进行预估时,由于超低频测量信号中含有邻近的频率成分,导致准同步采样算法对邻近频率成分检测困难,造成对基波频率预估的准确性较低。基于 Nuttall 窗三谱线插值法,由于采用三条谱线进行插值,相对于基于 Hanning 窗插值法所采用的双谱线插值,对基波频率的预估较为准确。

4) Newton 插值法阶数选择

在准同步序列插值重构时,Newton 阶数越大插值重构



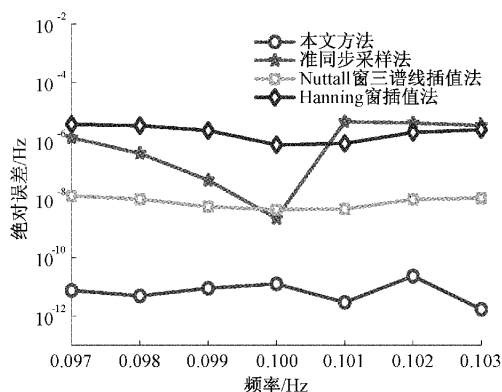


图 6 基波频率预估误差

序列越接近实际同步采样信号,但阶数越高会增加运算量,不同阶数时,以准同步采样周期插值重构的准同步序列,与同步采样序列的最大绝对误差,如图 7 所示。

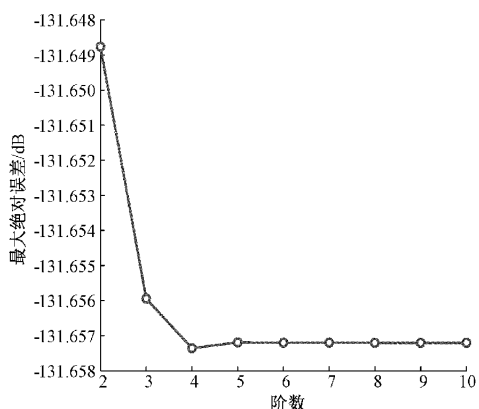


图 7 准同步序列与同步采样序列误差

由图 7 可知,随着阶数变大,最大绝对误差逐渐变小,在 5 阶以后趋于平缓。为使准同步序列更加逼近同步采样序列,并减少运算量,综合考虑文中选择 5 阶 Newton 插值算法,最大绝对误差为  $-131.6572$  dB。

### 4.3 频率波动仿真分析

由于超低频信号频率不一定符合  $0.1$  Hz,取信号频率波动范围为  $(0.1 \pm 0.003)$  Hz。采用基于 Nuttall 窗三谱线插值法,基于汉宁窗插值法,基于时域准同步法<sup>[19]</sup>和本文方法用于对超低频介损因数测量,并将测量结果进行对比分析,介损因数测量的相对误差,如图 8 所示。

由图 8 可知,本文方法由于采用 Prony 算法,能对基波频率进行准确的预估,并采用 Newton 插值法将非同步采样序列转换为同步采样序列,降低了频谱泄露和栅栏效应,使测量相对误差最小。基于时域准同步法由于采用准同步采样算法对基波频率进行预估,在超低频时对基波频率预估误差较大,导致对超低频介损因数测量误差较大,测量相对误差比本文方法高 1~4 个数量级。基于 Hanning 窗插值法的相对误差,比本文方法高 2~5 个数量级,相较于本文方法和 Nuttall 窗三谱线插值法误差较大。基于

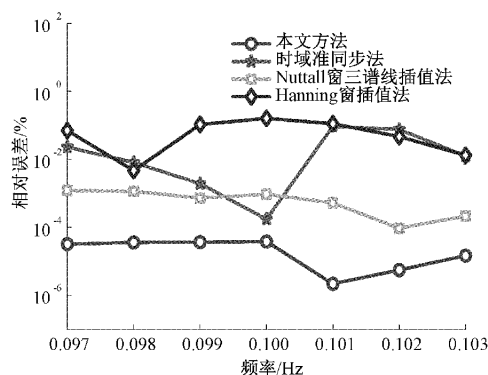
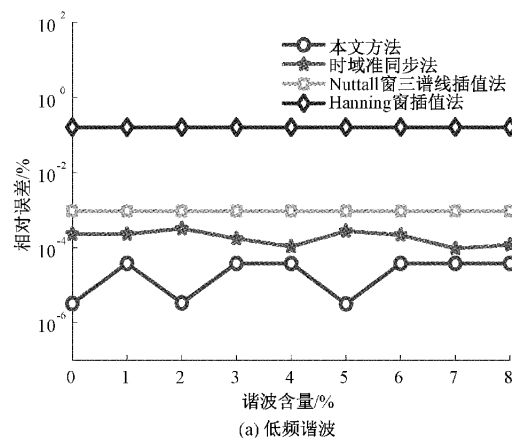


图 8 频率波动对介损因数测量影响

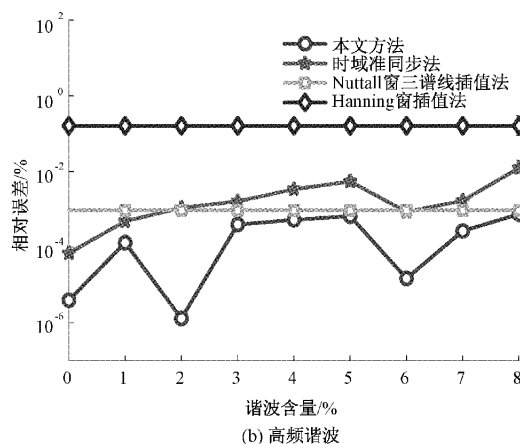
Nuttall 窗三谱线插值法相对误差比本文方法高 1~3 个数量级。通过仿真表明,在超低频频率波动时,本文方法的最大相对误差仅为  $3.838 \times 10^{-5} \%$ ,受频率波动影响较小,测量精度高,能满足对超低频介损因数的精确测量。

### 4.4 谐波含量变化仿真分析

在超低频介损因数测量时,信号中含有一定量的谐波分量,影响对超低频介损因数的测量。在谐波分量中,将低频的 5 Hz 谐波与基波比值,从 0% 增加到 8% 时,以及将高频的 33 Hz 谐波与基波比值,从 0% 增加到 8% 时,介损因数测量的相对误差,分别如图 9(a)和(b)所示。



(a) 低频谐波



(b) 高频谐波

图 9 谐波含量变化对介损因数测量影响

由图 9 可知,本文方法由于采用 Prony 算法,相对于加窗插值法和时域准同步法能对信号中基波频率进行准确预估,则在信号中低频谐波和高频谐波含量变化时,介质损耗因数测量相对误差最小,测量精度最高。根据图 9(a)可得,本文方法在低频谐波含量变化时,最大相对误差为  $3.832 \times 10^{-5} \%$ ,测量相对误差比基于 Hanning 窗插值法低 4 个数量级,比基于 Nuttall 窗三谱线插值法低 2~3 个数量级,比基于时域准同步法低 1~2 个数量级。根据图 9(b)可得,在高频谐波含量变化时,本文方法最大相对误差为  $1.059 \times 10^{-3} \%$ ,比基于 Hanning 窗插值法低 2~5

个数量级,比基于时域准同步法低 1~3 个数量级,测量误差整体上优于基于 Nuttall 窗三谱线插值法。通过仿真实验表明,本文方法在谐波含量变化时,对介质损耗因数测量有较高的测量精度,能满足对超低频介质损耗因数测量要求。

4.5 介损角变化仿真分析

介质损耗角变化时,介质损耗因数的测量精度会发生变化。图 4 电路模型中的电阻值在 80~120 MΩ(变步长为 10 MΩ)之间变化时,介质损耗因数测量的结果,如表 4 所示。

表 4 介损角变化对介质损耗因数测量影响

电阻值/ MΩ	理论介质损耗数	介质损耗因数相对误差/%			
		Hanning 窗插值法	Nuttall 窗三谱线插值法	时域准同步法	本文方法
80	3.315 727 981 081 15	$1.620 76 \times 10^{-1}$	$9.608 59 \times 10^{-1}$	$1.921 87 \times 10^{-1}$	$3.461 81 \times 10^{-6}$
90	2.947 313 760 961 02	$1.618 40 \times 10^{-1}$	$9.529 69 \times 10^{-1}$	$1.887 13 \times 10^{-1}$	$3.368 08 \times 10^{-6}$
100	2.652 582 384 864 92	$1.615 96 \times 10^{-1}$	$9.464 19 \times 10^{-1}$	$1.745 79 \times 10^{-1}$	$3.837 62 \times 10^{-5}$
110	2.411 438 531 695 38	$1.613 46 \times 10^{-1}$	$9.389 00 \times 10^{-1}$	$2.356 15 \times 10^{-1}$	$3.725 76 \times 10^{-5}$
120	2.210 485 320 720 76	$1.610 89 \times 10^{-1}$	$9.306 79 \times 10^{-1}$	$1.937 91 \times 10^{-1}$	$3.184 15 \times 10^{-6}$

由表 4 可知,当介质损耗角发生变化时,本文方法的介质损耗因数测量相对误差小于  $3.84 \times 10^{-5} \%$ ,测量误差比基于 Hanning 窗插值法低 4~5 个数量级,比基于 Nuttall 三谱线插值法和基于时域准同步法低 1~2 个数量级,具有较高的测量精度。通过仿真实验表明,本文方法受介质损耗角的变化影响较小,对超低频介质损耗因数测量具有较高的测量精度。

4.6 噪声信号影响仿真分析

在非实验室条件下,测量介质损耗因数时,存在不可忽略的噪声因素,噪声对介质损耗因数测量产生误差,影响测量精度。对电压信号添加不同信噪比的噪声信号,采用本文方法对介质损耗因数测量。在每个信噪比下,设置 100 次随机噪声信号进行测量,通过取平均值来衡量测量误差,测量结果如图 10 所示。

由图 10 可知,在信噪比增大时,测量误差整体趋于变小。在信噪比为 40 dB 时,由于噪声信号的干扰,造成 Prony 算法无法对基波频率准确预估,使测量结果产生较大误差。当噪声强度大时(SNR≤60 dB),测量误差较大;当噪声强度小时(SNR>60 dB),测量误差均值小于  $3.3 \times 10^{-3}$ 。通过仿真实验表明,对信号进行多次测量取平均值能降低测量误差;噪声信号的存在会对介质损耗因数测量产生影响,需要在测量时采取一定的降噪措施,提高测量精度。

5 结 论

本文提出一种基于 Prony 算法-准同步序列的超低频介损测量方法,采用 Prony 算法,Newton 插值法,FFT 以及介质损耗等效电路模型,获得超低频介质损耗因数。

针对 Prony 算法模型阶数选择和信号分量辨识问题,分别定义了模型阶数预估方法和能量比例系数,实现对模型阶数的设定和信号分量的辨识。

本文方法与目前采用的加窗插值傅里叶变换法相比,不需要对信号进行加窗和谱线插值处理,使测量信号采集时间短,采集数据量少,算法实现简单,与时域准同步法相比,由于采用 Prony 算法,能对邻近频率成分进行辨识,实现对基波频率的准确预估。

通过在频率波动,谐波含量变化,介质损耗角变化和噪声干扰情况下进行仿真实验。实验结果表明:本文测量方法与加窗插值傅里叶变换法和时域准同步法相比,对超低频介质损耗因数测量有较高的测量精度,能有效抑制频率波动,介质损耗角变化,噪声信号干扰和谐波含量变化对介质损耗因数测量的影响。

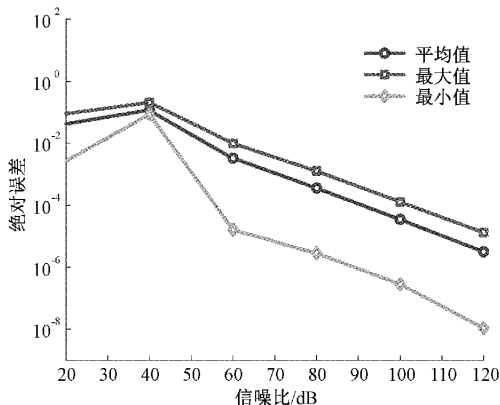


图 10 噪声信号对介质损耗因数测量影响

## 参考文献

- [1] 任志刚, 李伟, 周峰, 等. 基于超低频介损检测的电缆绝缘性能评估与影响因素[J]. 绝缘材料, 2018, 51(4): 64-68, 74.
- [2] 王凯文, 邓斌. 基于 DAE-IPSO-SVM 的电缆早期故障识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 29-35.
- [3] 张家午, 杨军亭, 刘兴瑞, 等. 10 kV 电缆超低频介质损耗检测技术应用[J]. 电气应用, 2019, 38(3): 68-70.
- [4] 张超, 邱衍江, 王维庆, 等. 基于余弦自卷积窗的高精度介质损耗角测量算法[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 109-117.
- [5] 孙斌煌, 杨赞峰, 苏宁, 等. 基于 0.1 Hz 超低频介损检测的配电电缆分析与评价[J]. 电气开关, 2020, 58(4): 97-99.
- [6] 张家军, 张新燕, 陈倩, 等. 基于改进全相位算法的高精度介质损耗角的测量[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3097-3104.
- [7] SU T, YANG M F, JIN T, et al. Power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(8): 953-961.
- [8] 黄海宏, 金春阳, 郝韩兵, 等. 氧化锌避雷器泄露电流的全相位 FFT 分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 210-216.
- [9] 蔡星月, 高云鹏, 李云峰, 等. 基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱间谐波检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 199-207.
- [10] 汪旭明, 田堃, 雷可君, 等. 基于 Blackman 窗六谱线插值 FFT 谐波分析方法[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(6): 22-26.
- [11] 邱衍江, 张超, 张新燕, 等. 基于双窗 apDFT 的高精度电容器介损角辨识算法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 81-87.
- [12] 刘冬梅, 杨重良, 张艳. 基于 Nuttall 自卷积窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 12-17.
- [13] WEN H, ZHANG J H, MENG Z, et al. Harmonic estimation using symmetrical interpolation FFT base on triangular self-convolution window [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 16-26.
- [14] LI J M, TENG Z S, TANG Q, et al. Dielectric loss factor measurement in power systems based on sampling sequence reconstruction approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4766-4775.
- [15] 杜伟静, 赵峰, 高峰阳. 基于 EEMD-RobustICA 和 Prony 算法的谐波和间谐波检测方法[J]. 计算机科学, 2018, 45(S2): 564-568.
- [16] 许仪勋, 李宁, 马丽梅, 等. 一种基于加窗插值 FFT 和 Prony 算法的谐波与间谐波检测方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 183-186, 201.
- [17] 张煜林, 陈红卫. 基于 CEEMD-WPT 和 Prony 算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 115-121.
- [18] 刘政, 陈俊, 李浩澜, 等. 基于 Prony 算法和小波变换的联合电力谐波分析策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(11): 174-178.
- [19] 王康, 滕召胜, 陈继斌, 等. 基于时域准同步的介损角快速测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 873-881.
- [20] 王永, 滕召胜, 李建闽, 等. 基于采样序列重构的高精度介损角测量方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5607-5615.
- [21] 孙鹏, 杨永越. 五点加权 FFT 介损角测量算法的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 88-92.
- [22] 郭成, 尹轲, 张艳萍, 等. 一种基于综合 DFT 和 Prony 算法的谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 1-9.
- [23] 李媛, 王海云. 基于 Nuttall 窗三谱线插值的介损角测量方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 15-20.
- [24] 李杰, 杨志华, 王应芬, 等. 基于加窗插值谐波分析法的容性设备介损角测量研究[J]. 云南电力技术, 2020, 48(2): 44-49.
- [25] 孟卓, 温和. 基于复化梯形的准同步采样频率测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2445-2453.

## 作者简介

焦裕鹏, 硕士研究生, 主要研究方向为电气测量技术及应用。

E-mail: 1282131557@qq.com

王玮(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力物联网、配电网故障检测。

E-mail: wwsdut@163.com

贾明娜, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为自动化技术。

E-mail: jiamn@kehui.cn