

非同步采样情况下有功电能时域计量新方法

赵良德¹, 庄磊¹, 黄丹¹, 曾喆昭²

(1. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:在非同步采样情况下,使用 FFT 分析电网信号时,会出现频谱泄漏现象,从而降低有功电能的计算精度。为保证基波和谐波有功电能的测算精度,提出时域分析基波和谐波参数的计算方法。该方法通过对基波信号进行积分来获取基波参数,在此基础上,建立基于傅里叶级数的电压和电流信号模型,并使用递推最小二乘法对采集的电压和电流信号进行模型辨识来获取基波和谐波参数,从而实现基波和谐波有功电能的测算。数值仿真结果表明,该方法不仅具有较高的有功电能测算精度,而且只需要 3 个额定工频周期窗口的采集数据即可获得基波和谐波的最优参数,进而可以预先获得 10 个额定工频周期窗口的有功电能,因而是一种有效的有功电能计量方法。

关键词:基波有功电能;谐波有功电能;模型辨识;递推最小二乘法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.008 中图分类号:TH89, TM714 文章编号:1673-9140(2020)01-0068-07

A new time domain measurement method of active electric energy under non-synchronous sampling

ZHAO Liangde¹, ZHUANG Lei¹, HUANG Dan¹, ZENG Zhezha²

(1. Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230061, China; 2. School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: If a power grid signal is analyzed by the FFT algorithm in the case of non-synchronous sampling, it will cause the spectral leakage, and calculation precision reduction of active electric energy. In order to ensure calculation accuracy of fundamental and harmonic active electric energy, a time-domain calculation method for fundamental and harmonic parameters is proposed. Fundamental parameters are calculated by the integral of fundamental signal. On this basis, voltage and current signal models are established based on Fourier series. Fundamental and their harmonic parameters are then identified by using the RLS algorithm to match the sample data of voltage and current signals. As a result, the measured values of fundamental and harmonic active electric energy are obtained. The numerical simulation results show that the proposed method has high measurement accuracy of active electric energy. The optimal parameters of fundamental and harmonic are obtained by the sample data in only three rated cycle windows in working frequency. In this way, the active electric energy of the ten rated operating frequency period can be obtained in advance. Hence, it is an effective measurement method of active electric energy.

Key words: fundamental active electric energy; harmonic active electric energy; model identification; RLS algorithm

电力系统的基波参数和谐波参数不仅是电能计量与电能品质的主要技术评估指标,同时也是谐波分析与谐波治理的重要技术指标^[1-5],特别是基波频率的测量精度不仅会直接影响谐波的分析精度,而且还会严重影响基波有功电能的计量精度和谐波有功电能的计量精度。在电网电压和电流信号中,如果电网基波信号的实际频率与 50 Hz 额定工频存在偏差,就会出现非同步采样情况。因此,在非同步采样情况下,研究有功电能的高精度计量方法具有重要的理论与实际意义。

为了测算基波和谐波的有功电能,需要分别测算基波瞬时平均功率和谐波瞬时平均功率,因而要求分别测算出基波的频率、幅值和初相角参数以及各次谐波的幅值和初相角参数,才能分别获得基波或谐波的瞬时平均功率或有功电能。因此,基波和谐波参数的测算精度是保证基波或谐波有功电能测算准确性的关键因素。现有基波和谐波参数的主要分析方法是采用加窗、插值的方法来提高基波、谐波参数测算的准确性^[1,6-7],从而在一定程度上保证有功电能计量的准确性。

由以上分析可知,为了提高基波和谐波有功电能的计量精度,要求高精度测算基波和谐波的参数,尤其基波频率的高精度测算是关键,否则难以保证谐波参数测算的准确性,从而影响基波和谐波有功电能的准确性。在电网基波频率的检测领域,已有不少研究成果^[8-13]。在非同步采样的情况下,使用傅里叶频谱分析方法会产生频谱泄露现象和栅栏效应^[9-10],因而会使基波频率的测量精度降低;使用周期测频方法尽管简单易行,然而,在噪声与谐波都同时存在的条件下,其基波频率的测量精度较差^[11];使用正交去调制法来测量基波频率,不仅需要具备很高的滤波技术^[12],而且难以实现;尽管使用 Lagrange 插值方法^[13]能够实时获得较高精度的基波频率测量值,然而,该方法只能测量基波频率,无法测量谐波参数,存在明显的局限性;使用前馈神经网络(feedforward neural network, FNN)的检测方法来测量基波参数^[14],尽管可以获得较高精度的基波测量值,并具有较好的噪声滤波效果,然而,该测量方法存在计算量大的局限性;使用迭代变权最小二乘 SVM 来测量基波参数^[15],该测量方法尽管

有效提高了检测的实时性、具备较好的噪声滤波效果,然而,该测量方法只能检测基波参数的幅值,却无法检测关键的基波频率,存在明显的局限性;基于 AM 的基波频率测量方法^[16]尽管可以有效抑制混频干扰,能够有效获得较高测量精度的基波频率,然而,该测量方法需要 0.25 s 以上的观测窗口时间,即要求具备 12 个以上额定工频周期时间的采样数据,因而存在计算量大、实时性不佳的局限性;使用 Algebraic polynomial 模型的基波测量方法^[17]对采集的基波信号进行曲线拟合以获得光滑的待测基波曲线,然后使用梯度下降法求解待测基波曲线相邻的 2 个过零点,从而获得待测基波信号的半个周期,进而获得待测基波信号的频率、幅值和相位,由于该方法只需要约 20 ms 观测窗(约 1 个额定工频周期)的样本数据就可以得到基波频率、幅值和相位的测量结果,实时性好、测量精度较高,然而也存在计算量较大的局限性;使用基于跟踪微分器的基波参数测量方法^[18]尽管显著提高了测量的实时性,然而,该方法的测量精度不很高。

为了进一步减小基波测量的计算量,有效提高测量精度和实时性,该文提出了一种基于积分方法的基波参数测量方法,在此基础上,分别建立了基于傅里叶级数的电压和电流信号模型,并使用递推最小二乘法(recursive least square, RLS)对采集的电网信号进行模型辨识以获取基波和各次谐波的参数,从而实现基波和谐波有功电能的测算。研究结果表明,该方法不要求同步采样,仅需要 3 个额定工频周期时间窗(0~60 ms)的观测数据即可获得较高精度的基波和谐波参数,从而可以预先测算出 10 个额定工频周期时间窗的有功电能,因而显著提高了有功电能计量的实时性,在智能电表有功电能计量领域具有重要的理论意义和应用价值。

1 周期非正弦信号有功电能描述

设周期非正弦电压、电流信号的时域模型分别为

$$u(t) = \sum_{j=1}^n A_j \cos(j\omega_0 t + \varphi_j) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{j=1}^n B_j \cos(j\omega_0 t + \theta_j) \quad (2)$$

其中, n 是谐波最高次数; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 是基波角频率, rad/s; f_0 是基波频率, Hz; A_j 和 φ_j 分别表示电压信号中第 j 次谐波分量的幅值和初相位; B_j 和 θ_j 分别表示电流信号中第 j 次谐波分量的幅值和初相位。基波和第 j 次谐波瞬时有功功率分别定义为

$$p_1(t) = i_1(t)u_1(t) \quad (3)$$

$$p_j(t) = i_j(t)u_j(t) \quad (4)$$

其中, 基波电压: $u_1(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$, 基波电流: $i_1(t) = B_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1)$; 第 j 次谐波电压: $u_j(t) = A_j \cos(j\omega_0 t + \varphi_j)$, 第 j 次谐波电流: $i_j(t) = B_j \cos(j\omega_0 t + \theta_j)$ 。因此, 基波瞬时有功功率为

$$p_1(t) = P_1 + 0.5A_1B_1 \cos(2\omega_0 t + \varphi_1 + \theta_1) \quad (5)$$

第 j 次谐波瞬时有功功率为

$$p_j(t) = P_j + 0.5A_jB_j \cos(2j\omega_0 t + \varphi_j + \theta_j) \quad (6)$$

且 $P_j = 0.5A_jB_j \cos(\varphi_j - \theta_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

因此, 谐波瞬时总有功功率为

$$p_h(t) = \sum_{j=2}^n p_j(t) \quad (7)$$

从 t_0 时刻到 t 时刻的时间范围内, 分别对式(5)、(7)进行时域积分, 即可获得基波、谐波有功电能:

$$E_1(t) = P_1(t - t_0) + \Delta E_1(t) \quad (8)$$

$$\Delta E_1(t) =$$

$$A_1B_1 \frac{\sin(2\omega_0 t + \varphi_1 + \theta_1) - \sin(2\omega_0 t_0 + \varphi_1 + \theta_1)}{4\omega_0}$$

$$E_h(t) = \sum_{j=2}^n [P_j(t - t_0) + \Delta E_j(t)] \quad (9)$$

$$\Delta E_j(t) =$$

$$A_jB_j \frac{\sin(2j\omega_0 t + \varphi_j + \theta_j) - \sin(2j\omega_0 t_0 + \varphi_j + \theta_j)}{4j\omega_0}$$

由式(8)、(9)可知, 在非同步采样情况下, 相同频率的电压分量和电流分量不再满足正交特性, 即 $\Delta E_j(t) \neq 0$ 。同理, 不同频率的电压分量和电流分量也不再满足正交特性, 其时域积分的结果也不等于 0, 因而会产生额外的有功电能分量^[1], 只是由于其分量值很小, 通常可以忽略不计, 因此, 总的有功电能可以近似表示为

$$E(t) = E_1(t) + E_h(t) \quad (10)$$

由上述分析可知, 基波有功电能和谐波有功电能分别由基波和谐波参数(频率、幅值和初相位)来

确定, 如果基波和谐波参数测算不准确, 则会直接影响基波、谐波有功电能的计量精度, 因此, 针对基波和谐波参数的时域测算方法进行详细研究。

2 待测基波的测算原理

假设待测基波的电压或电流信号经过低通滤波器滤除谐波后, 获得的待测基波信号为

$$s_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (11)$$

式中 f_0 、 A_1 和 φ_0 分别表示待测基波的频率、幅值和初相位。

2.1 待测基波的测量原理

1) 待测基波的幅值测量原理。

由式(11)可知, 基波的幅值为

$$\max(s_1) = A_1 \quad (12)$$

2) 待测基波的频率测量原理。

对式(11)进行积分, 可得其积分信号为

$$y(t) = \int_{t_0}^t s_1(t) dt = \int_{t_0}^t A_1 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) dt = \frac{A_1}{2\pi f_0} [\sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) - \sin(2\pi f_0 t_0 + \varphi_0)] \quad (13)$$

由式(13)可知, 积分信号的最大值为

$$\max(y) = \frac{A_1}{2\pi f_0} [1 - \sin(2\pi f_0 t_0 + \varphi_0)] \quad (14)$$

积分信号的最小值为

$$\min(y) = \frac{A_1}{2\pi f_0} [-1 - \sin(2\pi f_0 t_0 + \varphi_0)] \quad (15)$$

根据式(12)~(15), 可得基波频率为

$$f_0 = \frac{\max(s_1)}{\pi[\max(y) - \min(y)]} \quad (16)$$

根据式(16)可知, 从理论上而言, 待测的基波频率可以通过 $s_1(t)$ 的最大值及其积分信号 $y(t)$ 的最大值和最小值来获取。

3) 待测基波的初相位测量方法。

获得基波的频率和幅值参数后, 由式(11)可获得基波的初相位:

$$\varphi_0 = \arccos[s(t)/A_1] - 2\pi f_0 t \quad (17)$$

2.2 待测基波信号的软测量方法

2.1 节描述的基波参数测量原理是基于模拟信

号的测量方法。为了符合智能电网的发展趋势,对式(11)所示的待测基波信号离散化,以便实现数字化测量方法。设采样频率为 f_s ,采样周期为 $t_s=1/f_s$,则式(11)离散化为

$$s_1(k) = A_1 \cos(2\pi f_0 t_s k + \varphi_1) \quad (18)$$

以 $s_1(k)$ 作为采集的样本数据,考虑到积分信号 $y(t)$ 满足微分方程:

$$\dot{y}(t) = s_1(t) \quad (19)$$

因此,式(19)的离散化模型为

$$y(k) = y(k-1) + t_s s_1(k-1) \quad (20)$$

获得离散化样本数据 $s_1(k)$ 和 $y(k)$ 后,即可根据2.1节分析的基波参数测算原理进行数字化测算,即:

①根据式(12)可得待测基波的幅值:

$$A_1 = \max(s_1(k)) \quad (21)$$

②根据式(16)可得待测基波的频率:

$$f = \frac{\max(s_1(k))}{\pi[\max(y(k)) - \min(y(k))]} \quad (22)$$

③根据式(17)可得待测基波的初相位:

$$\varphi = \arccos[s_1(k)/A_1] - 2\pi f t_s k \quad (23)$$

其中, $k=0,1,\dots,m-1,m$ 是样本个数。特别是当 $k=0$ 时, $\varphi = \arccos[s_1(0)/A_1]$ 。

由式(21)~(22)可知,只要一个基波周期的样本数据即可获得基波参数的测算值。获得基波参数的测算值后,再详细研究谐波参数的测算方法。

3 谐波参数原理

3.1 电网信号建模

设最高谐波次数为 n 的电网电压或电流信号模型 $s(t)$ 为

$$s(t) = \sum_{j=1}^n A_j \cos(j\omega_0 t + \varphi_j) \quad (24)$$

式中 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。将式(24)展开为傅里叶级数的形式,即

$$s(t) = \sum_{j=1}^n [a_j \cos(j\omega_0 t) + b_j \sin(j\omega_0 t)] \quad (25)$$

式中 $a_j = A_j \cos(\varphi_j)$, $b_j = -A_j \sin(\varphi_j)$,且 $A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}$, $\varphi_j = -\arctg(b_j/a_j)$ 。

由于最高谐波频率为 $f_m = n f_0$,根据采样定理,采样频率要求满足: $f_s \geq 2n f_0$,且采样周期: $t_s =$

$1/f_s$,因此,式(25)的离散模型为

$$s(k) = \sum_{j=1}^n [a_j \cos(j\Omega_0 k) + b_j \sin(j\Omega_0 k)] \quad (26)$$

其中, $k=0,1,\dots,m-1,m$ 是样本个数, $\Omega_0 = \omega_0 t_s$ 是基波数字角频率。为了便于分析,分别设相关向量如下:

$$\mathbf{w} = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]^T \in R^{2n \times 1}$$

$$\mathbf{C}(k, :) = [\cos(\Omega_0 k), \dots, \cos(n\Omega_0 k)] \in R^{1 \times n}$$

$$\mathbf{S}(k, :) = [\sin(\Omega_0 k), \dots, \sin(n\Omega_0 k)] \in R^{1 \times n}$$

$$\text{以及 } \mathbf{C}_s(k, :) = [\mathbf{C}(k, :), \mathbf{S}(k, :)] \in R^{1 \times 2n}$$

因而,式(26)可简写为:

$$s(k) = \mathbf{C}_s(k, :)\mathbf{w} \quad (27)$$

由于电网电压或电流信号都可以表示为式(26)或式(27)的离散模型,因此,如果以 $s(k)$ 作为电网电压或电流信号的样本采集数据,则与其相匹配的参数辨识模型则为

$$y(k) = \mathbf{C}_s(k, :)\mathbf{w} \quad (28)$$

此时,向量 $\mathbf{C}_s(k, :)$ 中的 $\Omega_0 = \omega_0 t_s = 2\pi f t_s$,且其中的基波频率 f 则是根据式(22)获得的测算值。

由式(28)可知,这是一个多参数的目标优化问题。为了获得最优参数辨识,分别定义模型误差和性能指标(误差动能):

$$e(k) = s(k) - y(k), J = 0.5 \sum_{k=1}^m e^2(k)$$

如果对所有样本数据形成的误差动能最小,即 $J = \min$,则由式(28)所示的参数辨识模型就是电网电压或电流信号的最优辨识模型,且参数向量 $\mathbf{w} = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]^T$ 则是最优的参数向量。获得最优待测参数后,即可获得基波和各次谐波的最优幅值和初相位,即

$$A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}, \varphi_j = -\arctg(b_j/a_j), \\ j = 1, 2, \dots, n$$

3.2 模型参数最优算法

尽管多变量目标优化的方法有很多,然而,考虑到递推最小二乘法(RLS)具有噪声滤波功能,因此,该文使用RLS算法来实现未知电压或电流信号参数优化辨识。

随机产生初始参数向量: $\mathbf{w} = \text{rand}(2n, 1)$;由式(28)计算辨识模型值: $y(k) = \mathbf{C}_s(k, :)\mathbf{w}$;计算模型辨识误差: $e(k) = s(k) - y(k)$;为了使误差动能最小,即 $J = \min$,则有RLS算法^[17]。

①计算增益向量:

$$q_k = \frac{\mathbf{P}_k \mathbf{C}_s^T(k, :)}{\lambda + \mathbf{C}_s(k, :)\mathbf{P}_k \mathbf{C}_s^T(k, :)} \quad (29)$$

②参数向量更新:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + e(k)q_k \quad (30)$$

③协方差矩阵更新:

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - q_k \mathbf{C}_s(k, :)]\mathbf{P}_k / \lambda \quad (31)$$

式中 λ 是遗忘因子,且 $0 < \lambda \leq 1$,当 $\lambda = 1$ 时是基本的 RLS 算法; $\mathbf{P}_k \in R^{2n \times 2n}$ 是协方差矩阵,初始协方差矩阵 $\mathbf{P}_0 = \alpha \mathbf{I}$,且 $\mathbf{I} \in R^{2n \times 2n}$ 是单位矩阵,其中 α 是一个很大的实数,通常取 $\alpha \geq 10^3$ 。

对于所有样本数据 $s(k)(k=1, \dots, m)$,使用式(29)~(31)进行递推更新后,即可获得最优辨识模型的参数向量 \mathbf{w} ,进而获得最优的电网基波和各次谐波的幅值和初相位,从而获得准确的基波、谐波有功电能以及总的有功电能。

4 仿真结果与分析

为了便于比较分析,该文使用的电压、电流信号以及采样频率均与文献[1]相同,其信号的数学模型如式(1)、(2)所示,最高谐波参数为 $n=11$,电网的电压和电流信号的相关参数如表1所示^[1]。该文实验中,采样频率 $f_s=10.24$ kHz,时间窗 $0 \sim 60$ ms,共采集数据 614 个,相当于 3 个额定工频(50 Hz)周期的采集数据。其中,第 1 个额定工频周期时间窗($0 \sim 20$ ms)的 205 个电压基波采集数据主要用于基波频率的测算,为后续的电压基波与谐波参数以及电流基波与谐波参数的辨识奠定前期基础;第 2、3 个额定工频周期时间窗($20 \sim 60$ ms)的 409 个电压采集数据和 409 个电流采集数据分别用于电压基波与谐波参数的最优辨识以及电流基波和谐波参数的最优辨识。

仿真 1. 基波参数测算实验

将表 1 所示的电网电压信号通过低通滤波器滤除谐波成分后,可获得基波电压信号。使用该文方法进行基波参数测算,其测算结果如表 2 所示。其中,基波频率测算值的最大相对误差小于 $1.4e-3\%$;幅值测算值的最大相对误差小于 $4.4e-5\%$;初相位测算值的最大相对误差小于 $1.3e-4\%$ 。显然,该文方法测算基波信号的参数具有很高的测算精度。

表 1 电网电压与电流信号的基波与谐波参数

Table 1 The parameters of fundamental and harmonic components of voltage and current signals

谐波次数	电压参数		电流参数	
	A_j/V	$\varphi_j/(\circ)$	B_j/I	$\theta_j/(\circ)$
1	220.5	32	10	29
2	1.2	20	0.15	5
3	3.5	68	0.8	64
4	0.9	46	0.13	77
5	2.1	19	0.65	49
6	0.5	85	0.1	15
7	1.3	53	0.48	61
8	0.4	28	0.05	37
9	1.1	50	0.32	53
10	0.2	16	0.03	20
11	0.5	72	0.21	38

表 2 基波电压信号参数测算

Table 2 Parameters of fundamental components of voltage

基波频率/ Hz	基波电压信号参数测算结果		
	频率/Hz	幅值/V	相位/ (\circ)
49.5	49.494 0	220.476 5	31.990 2
49.6	49.598 5	220.499 0	31.999 6
49.7	49.698 3	220.492 1	31.996 7
49.8	49.799 1	220.487 8	31.994 9
49.9	49.900 6	220.499 9	32.000 0
50.0	49.997 2	220.483 0	31.992 9
50.1	50.100 7	220.494 8	31.997 8
50.2	50.200 6	220.497 7	31.999 0
50.3	50.293 6	220.475 5	31.989 8
50.4	50.398 7	220.498 6	31.999 4
50.5	50.499 2	220.493 3	31.997 2

仿真 2. 基波与谐波有功电能测算实验

在仿真 1 的实验中已获得基波频率后,使用该文方法来辨识电压、电流信号的基波和谐波参数,进而获取基波、谐波有功电能的测算值。在 RLS 算法中,取 $\lambda=1, \alpha=1\ 000$ 。基波、谐波有功电能的测算结果分别如表 3、4 所示。

由表 3 所示的基波有功电能测算结果和表 4 所示的谐波有功电能测算结果可知,与文献[1]的测算结果相比,该文算法具有更高的有功电能测算精度,其中,基波有功电能测算值的最大相对误差小于 0.001% ,谐波有功电能测算值的最大相对误差小于 0.116% 。

表 3 基波有功电能测算结果

Table 3 Calculated fundamental active electric energy

基波频率/ Hz	基波有功电能测算结果/J		
	理论值	该文算法	文献[1]
49.5	222.09	222.090 4	222.01
49.6	221.64	221.639 8	221.60
49.7	221.20	221.202 4	221.17
49.8	220.80	220.798 8	220.76
49.9	220.46	220.455 3	220.40
50.0	220.20	220.197 8	220.20
50.1	220.03	220.032 5	220.17
50.2	219.98	219.976 6	220.27
50.3	220.03	220.025 5	220.38
50.4	220.19	220.188 2	220.50
50.5	220.45	220.443 1	220.67

表 4 谐波有功电能测算结果

Table 4 Calculated harmonic active electric energy

基波频率/ Hz	谐波有功电能测算结果/J		
	理论值	该文算法	文献[1]
49.5	0.536	0.5328	0.526
49.6	0.536	0.5353	0.531
49.7	0.536	0.5349	0.534
49.8	0.536	0.5351	0.535
49.9	0.535	0.5354	0.535
50.0	0.535	0.5333	0.535
50.1	0.536	0.5360	0.535
50.2	0.536	0.5366	0.534
50.3	0.537	0.5342	0.532
50.4	0.536	0.5360	0.529
50.5	0.536	0.5356	0.522

5 结语

该文提出的非同步采样情况下有功电能时域计量新方法,不仅计算简单、计算量小,而且基波频率和有功电能的测算精度高。该方法的主要创新点是只需要 3 个额定工频周期时间窗(0~60 ms)的采集数据即可分别获得电压和电流的基波与谐波参数,从而可以预先测算出 10 个额定工频周期时间窗(0~200 ms)的基波、谐波有功电能,因而显著提高了有功电能测算的实时性。而文献[1]提出的基于谐波子组加窗 FFT 的有功电能计算方法是频域

计算方法,不仅计算复杂,而且需要 10 个额定工频周期时间窗(0~200 ms)共 2 048 个采集数据来进行分析计算,因而计算量大。仿真结果表明,与文献[1]的结果相比,该文方法具有更高的有功电能计算精度,因而是一种有效的有功电能测算方法。

参考文献:

- [1] 陈垒,赵伟,肖勇,等. 非整周期采样条件下有功电能计量的新算法[J]. 仪器仪表学报,2017,38(4): 861-869.
CHEN Lei, ZHAO Wei, XIAO Yong, et al. New active electric energy measurement algorithm under non-integer-period sampling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 861-869.
- [2] 吴超凡,陈隆道. 应用于电力谐波分析的改进相位差校正法[J]. 电工技术学报,2017,32(7):158-164.
WU Chaofan, CHEN Longdao. Improved phase difference correction method applied to power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7):158-164.
- [3] 王泽,杨洪耕,袁晓冬. IEC 框架下非同步采样时的谐波和间谐波测量方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(3): 69-75.
WANG Ze, YANG Honggeng, YUAN Xiaodong. Measuring method of harmonics and inter-harmonics with nonsynchronous sampling in IEC framework[J]. Automation of Electric power systems, 2015, 39(3): 69-75.
- [4] 曾喆昭,文卉,王耀南. 一种高精度的电力系统谐波智能分析方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10): 23-27.
ZENG Zhezhaohao, WEN Hui, WANG Yaonan. An approach with high accuracy for intelligent analysis for power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):23-27.
- [5] 杨金涛,乐健,汪妮,等. 谐波背景下电能计量系统的计量误差分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(13): 144-150.
YANG Jintao, LE Jian, WANG Ni, et al. Analysis of measurement error for electric energy metering system under harmonic conditions[J]. Automation of Electric power systems, 2015, 39(13): 144-150.
- [6] 刘冬梅,杨重良,何怡刚,等. 基于 Rife-Vincent 自卷积窗三谱线插值 FFT 电力谐波分析[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(9): 1351-1360.
LIU Dongmei, YANG Chongliang, HE Yigang, et al.

- Harmonic analysis of power system based on Rife-Vincent self-convolution window triple-spectral-line interpolation FFT[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(9):1351-1360.
- [7] 张鸿博,蔡晓峰,鲁改凤. 基于双窗全相位FFT双谱线校正的电力谐波分析[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(12): 2835-2841.
ZHANG Hongbo, CAI Xiaofeng, LU Gaifeng. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(12): 2835-2841.
- [8] 黄奂,卢泉,黄阳,等. 基于奇异值分解和总体最小二乘一旋转矢量不变技术的电力系统基波频率测量方法[J]. *电测与仪表*, 2014, 51(16):78-84.
HUANG Huan, LU Quan, HUANG Yang, et al. A fundamental frequency measurement method for power system based on singular value decomposition and TLS-ESPRIT[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51(16):78-84.
- [9] Thomas D W P, Woolfson M S. Evaluation of frequency tracking methods[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, 16(3):367-371.
- [10] 磨少清,李啸聪. 一种高精度的改进傅里叶测频算法[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(12):48-49+54.
MO Shaoqing, LI Xiaocong. An improve high-accuracy algorithm for frequency measurement based on fourier transform[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(12):48-49+54.
- [11] Aghazadeh R, Lesani H, Sanaye-Pasand M. New technique for frequency and amplitude estimation of power system signals[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 152(3):435-440.
- [12] Pradhan A K, Routray A, Basak A. Power system frequency estimation using least mean square technique[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(3):1812-1816.
- [13] 吴杰康,龙军,王辑祥. 基于数字微分算法的系统频率快速准确测量[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(4):93-97.
WU Jiekang, LONG Jun, WANG Jixiang. An algorithm for power system frequency measurement based on numerical differentiation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(4):93-97.
- [14] 王勇,付志红,张淮清,等. 基于前馈神经网络的电网基波高精度检测[J]. *电网技术*, 2011, 35(8):124-128.
WANG Yong, FU Zhihong, ZHANG Huaiqing, et al. High precision detection of fundamental of power grid based on back propagation neural network[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(8):124-128.
- [15] 王允建,谢贝贝,胡治国. 电力谐波检测迭代变权最小二乘快速基波提取方法[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(12):2991-2995.
WANG Yunjian, XIE Beibei, HU Zhiguo. Rapidly fundamental wave detection of electric power harmonic detection based on iteration variable weight least square algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(12): 2991- 2995.
- [16] 李军,王越超. 一种基于幅值调制的新型电力系统正弦频率测量方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(7):144-150.
LI Jun, WANG Yuechao. A novel power system sinusoidal frequency measurement method based on amplitude modulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(7):144-150.
- [17] 刘理云,曾喆昭. 基于曲线拟合模型的电网基波测量原理研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(11):2798-2803+2812.
LIU Liyun, ZENG Zhezhaohao. Measuring principle research on fundamental wave of grid based on curve fitting model[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(11): 2798-2803+2812.
- [18] 张开明,庄磊,黄丹,等. 基于跟踪微分器的基波测量方法研究[J]. *测控技术*, 2018, 37(9):117-120+125.
ZHANG Kaiming, ZHUANG Lei, HUANG Dan, et al. Research on measuring approach of fundamental signal based on tracking differentiator[J]. *Measurement and control technology*, 2018, 37(9):117-120+125.