

考虑复杂谐波的电网功率计算方法研究与实现

王闰羿^{1,2}, 李玉平^{1,2}, 张玮^{1,2}, 康丰^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 南京 210003;
2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 南京 211153)

摘要: 对实际运行的含有各类谐波及间谐波的电网系统的功率计算方法进行研究, 并给出了一套较为完整的解决方案。该方案综合多种功率电能计算方法, 并进行方法整合, 形成了通用的功率计算理论。仿真结果表明, 该方案不仅可以基于频率自适应的方式实现有功功率与无功功率的精确计算, 还可以得到基波与各谐波的功率分布, 有助于谐波源的辨识, 能够更好地服务于无功补偿和系统参数控制, 提高电能质量。


关键词: 谐波源; 间谐波源; 功率计量; 频率自适应; 无功补偿; 电能质量

文章编号: 1007-1881(2022)02-0040-07

DOI: 10.19585/j.zjdl.202202006

中图分类号: TM721

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research and Implementation of Power Measurement Method of Networks Considering Complicated Harmonic

WANG Runyi^{1,2}, LI Yuping^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, KANG Feng^{1,2}

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China;

2. Nanjing Guodian Nanzi Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: The paper studies the power measurement methods of the operating power grids with various types of harmonics and inter-harmonics and gives a relatively complete solution, which sums up and integrates a variety of power and energy measurement methods, forming a universal power calculation theory. The simulation results show that this solution can not only achieve accurate measurement of active power and reactive power based on frequency-adaptive technology, but also obtain the power distribution of the fundamental wave and each harmonic, helping harmonic source identification, reactive power compensation, control of system parameters and improvement of power quality.

Keywords: harmonic sources; inter-harmonic sources; power measurement; frequency-adaptive; reactive power compensation; power quality

0 引言

电力能源作为当前国民经济生活的主要能源之一, 其应用日益广泛, 因此电能计量的精准程度十分重要^[1], 其涉及发电、供电及用电等多方利益。理想情况下, 对于标准正弦波形的电压与电流, 通过已有的成熟功率理论可以解决计量问题。而随着电力电子技术的快速发展, 非线性与冲击性的负载在电网中越来越多^[2-3], 导致电网中开始出现一众谐波源与间谐波源, 且电网自身频率也在不断波动^[4-5], 快速实现电能的高精度计量存在难度。因此, 谐波与间谐波的研究逐渐成为电网电能计量领域的重点与难点, 是治理电网谐波问题的出发点与重要依据。

为了减小电网中复杂谐波对功率电能计算的影响, 国内外研究人员提出了许多谐波与间谐波的分析方法, 主流的有快速傅里叶变换算法、小波变换算法、瞬时无功功率算法、谱估计方法、希尔伯特-黄变换算法和神经网络算法等^[6-10]。傅里叶变换是电网谐波计算与分析的基本算法, 但同时也最易受到频率混叠、频谱泄漏和非同步等因素的影响^[11]; 其他各类方法在不同的谐波条件下也各有优劣, 具体在此不作赘述。

含复杂谐波源的电网功率计算实际上仍然一直缺乏行之有效的方法, 因此本文提出了一种功率计算方案并予以验证。该方案通过对原始信号进行不同的前置处理, 在实现对总电能精确计量的同时, 可以对有限次谐波功率进行计算与分析,

对系统中的间谐波以及高频分量也可以实施有效监测。

1 电网谐波和间谐波的概念及影响

1.1 谐波和间谐波的概念及来源

IEC(国际电工委员会)对谐波与间谐波的定义为:在电网信号中,频率为基波频率整数倍的信号分量称为谐波;而频率为基波频率非整数倍的信号分量称为间谐波,也称为分数次谐波^[12]。

电网信号中通常包含直流分量、谐波与间谐波,可表示为:

$$f(t) = C_0 + \sum_{m=1}^M (C_m \sin m\omega_1 t + \varphi_m) + \sum_{k=1}^N (C_k \sin \omega_k t + \varphi_k) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为随时间变化的电网信号,它由直流偏置分量 C_0 、谐波次数为 $1\sim M$ 的谐波分量及 N 类间谐波分量组成; C_m 为第 m 次谐波的幅值; ω_1 为基波角频率; φ_m 为第 m 次谐波的初相角; C_k 、 ω_k 、 φ_k 分别为第 k 类间谐波的幅值、基波角频率及初相角,若令 $\lambda = \omega_k / \omega_1$,对于间谐波来说, λ 为非整数,且当 $\lambda < 1$ 时,该分量为次谐波。

电力系统中所有非线性的设备和负荷都可以看做是谐波源。其中典型的谐波/间谐波源主要有以下几类:

1)电磁饱和型。发电机、变压器和电抗器等各类铁心设备,其铁磁饱和特性是非线性的,主要产生奇数次谐波。

2)电力电子开关型。整流器、逆变器和晶闸管等开关设备,由于此类设备从系统中获取的是不完整的正弦波,因此反馈入电网的电流中含有大量谐波分量。

3)电弧型。炼钢电弧炉及电弧焊机等各类电弧设备,其电弧电压与电弧电流之间不规则且随机的波形关系导致了非线性的伏安特性变化。

1.2 谐波及间谐波下电网功率的数学模型

电网系统的简化模型如图1所示。图1中电源为标准的正弦信号 $u(t)$; Z_L 为线路阻抗; Z_M 为非线性的负载阻抗; $i(t)$ 为回路电流; M 点为电能计量点。

可以得到该模型下电网负载侧的平均功率 P_M 的表达式为:

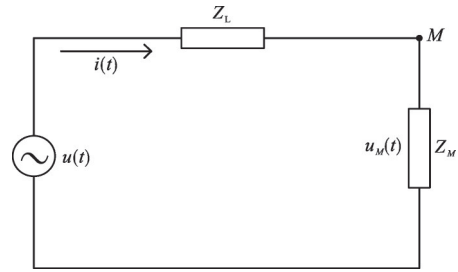


图1 电网简化模型

$$P_M = \frac{1}{T} \int_0^T p_M(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_M(t) \cdot i(t) dt \quad (2)$$

令

$$\begin{cases} u_M(t) = u_{M1}(t) + u_{MH}(t) \\ i(t) = i_1(t) + i_H(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{M1} 和 i_1 分别为 M 点的基波电压与流经的基波电流; u_{MH} 和 i_H 分别为 M 点的畸变电压与流经的畸变电流。由此可以得到:

$$\begin{aligned} p_M(t) &= [u_{M1}(t) + u_{MH}(t)][i_1(t) + i_H(t)] = \\ &= u_{M1}(t)i_1(t) + u_{M1}(t)i_H(t) + \\ &= u_{MH}(t)i_1(t) + u_{MH}(t)i_H(t) = \\ &= \underbrace{p_1(t)}_1 + \underbrace{p_{1H}(t)}_2 + \underbrace{p_{H1}(t)}_3 + \underbrace{p_H(t)}_4 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:1—4分别代表基波有功功率、基波电压与畸变电流产生的有功功率、畸变电压与基波电流产生的有功功率及畸变电压电流产生的有功功率。除基波功率外,其余部分的计算均存在较大难度,在谐波含量显著、复杂时难以保证功率计算的精度,效果非常不理想。

1.3 谐波及间谐波的危害与影响

电力系统中谐波与间谐波的问题已成为一大公害,对系统的稳定与安全构成了多方面的威胁,主要有以下几点:

1)对电力一次设备造成影响,易引起谐振现象,导致设备与线路损耗增大,甚至发生过电流、过电压等情况,损坏电力设备。

2)对计量仪表产生影响,易导致磁电型和感应型电表仪表计量和指示不准确,数字式电表则易引起频率混叠或栅栏效应。

3)对电力系统外部环境造成影响,如噪音、有害磁场等^[13-14]。

随着电力系统的不断扩大与复杂度的提升,如今对于性能更为强大的数字及智能电表的需求

也在向高精度、分时段、多功能和网络化等方向发展, 电力行业亟需可以实现谐波功率准确测量分析的电能计量装置, 以便有效识别系统内的各类谐波源。

2 复杂谐波状态下的功率计量算法原理

针对不同系统产生谐波的特点以及用户对于电能计量的需求差异, 普遍存在以下计量方式^[15-16]:

- 1) 对基波与所有谐波信号的电能实现全部计量, 称为全能量方式。
- 2) 仅计量基波及有限次谐波的电能。
- 3) 仅计量基波电能, 称为基波计量方式。
- 4) 对基波与谐波电能分别计量, 称为谐波计量方式。

上述方式单独反映的电能信息并不全面, 全能量方式对谐波源的辨识度不足, 对有害谐波缺乏处理手段; 基波或谐波计量方式则易受高次谐波及间谐波的影响而产生较大误差。

针对电网电能计量的现状, 该方案旨在利用1台电能计量装置实现多种功能的集成, 具体方案如图2所示。

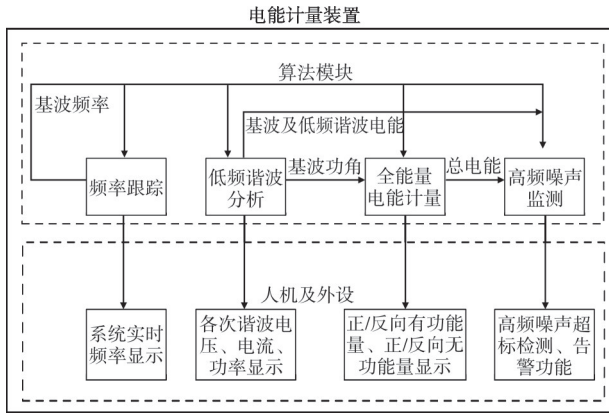


图2 电能计量装置算法结构

下文将对装置各基本功能的原理进行简要阐述。原理介绍中以单相电压电流为例, 实际应用中功率及电能为三相的叠加。

2.1 频率跟踪技术

实际应用中主流的频率跟踪算法有过零点法、傅式测频法等。鉴于计量装置对计算实时性及运算量较大的要求, 采用了基于傅里叶变换的快速频率跟踪算法^[17-19]。

假设电压输入信号为 $u(t) = A \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$, 其幅值为 A , 初始频率为 f_1 , 角频率为 ω_1 , 装置每周波采样点数为 N 。对采样序列做傅里叶变换后的实部、虚部分别为 $U_R = A \cos \varphi_1$ 和 $U_I = A \sin \varphi_1$ 。当前时刻电压的相位为:

$$\varphi_1 = -\arctan(U_I/U_R) \quad (5)$$

频率恒定的情况下, 每隔一个周波计算得到的相位是不变的。但若在某一时刻电压的频率变为 f_2 , 角频率变为 ω_2 , 此时计算得到的电压相位为 φ_2 。由此可以得到:

$$\begin{cases} \omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega \\ f_2 = f_1 + \Delta f \\ \varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\omega t = \varphi_1 + 2\pi\Delta f t \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以得到频率变化 Δf 为:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi N \Delta t} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi T_1} \quad (7)$$

式中: T_1 为频率为 f_1 的电压信号的周期。

电能计量装置的初始频率可设置为 50 Hz, 利用式(5)~(7), 每个周波都对电压频率进行跟踪计算, 根据计算得到的 Δf 修正当前的频率值, 同时调整硬件的采样频率, 形成同步采样。

2.2 低频谐波功率分析

经低通滤波回路滤除高频信号后的电压及电流信号包含的基波分量占绝大部分, 同时含有少量低频谐波分量。装置对电压及电流信号执行全波傅里叶变换, 以此计算得到基波及各次谐波的电压及电流的实部与虚部, 从而计算得到基波及各次谐波的电压与电流的有效值及功率因数角, 进而计算有功及无功功率, 具体计算公式为:

$$\begin{cases} U_{RMS,n} = \sqrt{U_{R,n}^2 + U_{I,n}^2} \\ I_{RMS,n} = \sqrt{I_{R,n}^2 + I_{I,n}^2} \\ \varphi_n = \arctan\left(\frac{I_{I,n}}{I_{R,n}}\right) - \arctan\left(\frac{U_{I,n}}{U_{R,n}}\right) \\ P_n = U_{RMS,n} I_{RMS,n} \cos \varphi_n \\ Q_n = U_{RMS,n} I_{RMS,n} \sin \varphi_n \end{cases} \quad (8)$$

式中: $U_{R,n}$ 、 $U_{I,n}$ 、 $I_{R,n}$ 、 $I_{I,n}$ 分别为电压及电流 n 次谐波的实部与虚部; $U_{RMS,n}$ 和 $I_{RMS,n}$ 分别为电压及电流 n 次谐波的有效值; φ_n 为 n 次谐波的功率因数角; P_n 和 Q_n 分别为 n 次谐波的有功功率与无功功率; $n=1, 2, 3, \dots, 13$, 表示电网中的基波及 2~13 次谐波。

装置在人机界面上实时显示基波及各次谐波的有功功率和无功功率，同时对以往的功率进行曲线记录，用户可以根据需要调取功率的年、月、日曲线。根据不同时段的谐波功率分布，有助于辨识系统中所存在的谐波源。

2.3 全能量电能计量

电能的计量精准程度是评价一个电能计量系统优劣的最重要的指标，该功能也是计量装置的核心。本方案通过全通回路以及高采样频率将电压及电流信号不失真的采集，并通过短窗积分实现有功能量的累计，具体原理如下。

1)通过采样点积分的方法计算得到单周波电压及电流的真有效值：

$$\begin{cases} U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) \cdot u(n)} \\ I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cdot i(n)} \end{cases} \quad (9)$$

式中： N 为每周波采样点数，采样频率须达到6 kHz以上； $u(n)$ 和 $i(n)$ 分别为电压及电流的采样点序列， $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

2)通过电压与电流采样点短窗口积分的方法进行有功电能累计：

$$\begin{cases} \Delta E_{p+} = \sum_{n=0}^{N-1} u(n)i(n)\Delta t = \frac{1}{fN} \sum_{n=0}^{N-1} p(n), \\ \varphi_1 \in \left(-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}\right) \\ \Delta E_{p-} = \sum_{n=0}^{N-1} u(n)i(n)\Delta t = \frac{1}{fN} \sum_{n=0}^{N-1} p(n), \\ \varphi_1 \in \left(\frac{\pi}{2} \sim \frac{3\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中： φ_1 为计算低频谐波功率时实时计算得到的基波功率因数角； ΔE_{p+} 和 ΔE_{p-} 分别为本次计算需要进行累计的正向和反向有功分量的增量； f 为当前频率； $p(n)$ 为瞬时有功功率序列。当基波功率因数角在 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 时，装置进行正向有功能量的累加；反之当基波功率因数角在 $\pi/2 \sim 3\pi/2$ 时，装置进行反向有功能量的累加。

3)通过电压与电流的真实有效值计算得到当前周波的视在功率；根据基波的功率因数角确定无功功率的正负性，并进行无功能量的累计：

$$\begin{cases} S = U_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}} \\ P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) i(n) \\ \Delta E_{q+} = \frac{1}{f} \sqrt{S^2 - P^2}, \varphi_1 \in (0 \sim \pi) \\ \Delta E_{q-} = -\frac{1}{f} \sqrt{S^2 - P^2}, \varphi_1 \in (-\pi \sim 0) \end{cases} \quad (11)$$

式中： S 为视在功率； E_{q+} 和 E_{q-} 分别为本次计算需要进行累计的正向和反向无功分量的增量。当基波功率因数角在 $0 \sim \pi$ 时，装置进行正向无功能量的累加；反之，当基波功率因数角在 $-\pi \sim 0$ 时，装置进行反向无功能量的累加。

计量装置实时累计电网运行时的正、反向的有功及无功功率，系统的负荷情况可以通过年、月、日的形式形成报表供用户查询，当需要重新开始累计时，可进行电量清零操作。

3 考虑复杂谐波的电网电能计算硬件和功能方案

电能计算方案往往都存在技术缺陷或整体方案存在局限性。本文通过对各类功率理论的研究，提出一种具备多种应用意义的电能计算方案。

3.1 方案硬件设计

该方案相比于多数既有电能计算方案，最显著的特点是在模拟量的采样环节上，如图3所示。

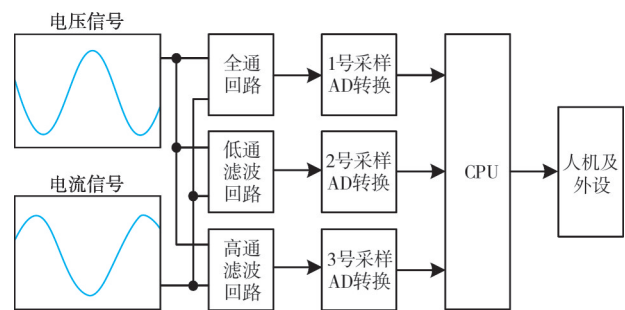


图3 硬件设计框图

图3中，电压及电流信号在采集器前端进行了分流，装置将这些信号复制出完全相同的3路，分别经全通回路、低通滤波回路以及高通滤波回路后独立进行采样与模数转换。3种滤波回路之间配置有电气隔离，以保证信号前置处理时互不干扰。由处理器接收各模数转换芯片传送的数字量信号，根据不同的功能要求对同一信号的不同存在形式

作特定计算处理, 并将计算结果传送至人机界面, 根据装置设定传递信号至外部设备。

在该方案中, 将原始的电压及电流信号在物理上划分为不同的通道, 并进行不同的滤波或全通处理(例如在不同的采样回路中, 各自的采样频率可以分别设置以满足不同的需要)。该方案避免了单一回路滤波条件下信号信息不完整导致功能受限的问题; 由同一处理器处理还可以实现不同信息的交互, 减少了运算工作。

3.2 方案功能介绍

3.2.1 系统基波频率实时跟踪

实时跟踪计算得到的系统基波频率是其他各项功率计算的基础。装置本身也要依靠系统频率的跟踪实时调节采样频率, 使各功能模块始终处于同步采样的模式下。

基波频率的实时跟踪由2号采样及模数转换回路提供的电压信号经处理器计算处理得到, 经过低通滤波后的电压信号是可靠的用于实时计算频率的数据基础, 可以有效避免高频分量引入所引起的频率混叠现象。

3.2.2 全能量方式系统电能计算

该功能是电能计算装置的核心功能模块。由于电能的计算精度影响发电、供电及用电等多方的利益, 尤其是有功能量的计算, 因此对系统的电能计算应该采用全能量的方式。

故而设计全通回路的目的是可以不失真地将系统的电压及电流信号传递进入计量装置, 由1号采样及模数转换回路进行全频带高频采样, 尽可能地不丢失高频信号, 通过该类数据源不断计算累计电能。

3.2.3 系统低频分量分析

电力系统中很多设备的使用都会产生谐波。当负载中的电感、电容参数不是常数时, 电压及电流波形均会发生畸变, 电源端如换流站的整流器件、无功补偿装置等也都是谐波源。在电网中谐波源有大小之分, 不同的设备所产生谐波的类型也不尽相同, 电源侧与负载侧的谐波功率的方向也有所区别, 因此对各次谐波进行计算分析可以识别系统中所存在的各类谐波源, 对于有害的谐波源可以及时定位与隔离。

普通的谐波频率不会太高, 绝大部分均为13

次及以下的谐波, 因此该功能应利用低通滤波后的信号进行频谱分析计算, 低通滤波回路的截止频率应至少高于650 Hz。

3.2.4 系统高频噪声监测

该功能主要利用经高通滤波回路之后, 由3号采样及模数转换回路提供的高频信号, 主要是监测频率为3 kHz以上的噪声信号。

经高通滤波回路滤除低频信号后的电压及电流信号在没有高频噪声的情况下, 理论上信号强度应该非常微弱。装置通过分别对滤除低频分量后的电压及电流进行能量积分计算可知, 当电压或电流的高频能量到达门槛时, 装置发出告警信号, 点亮装置高频噪声告警指示灯, 同时装置进行高频录波, 记录高频噪声出现时的波形变化。

当低频能量与高频能量之和与总电能计算结果差距较大时, 可能存在较大的间谐波。若该现象稳定, 则可利用小波变换等技术手段进一步分析间谐波的特点并以此定位寻找谐波源^[20-24]。

4 误差分析试验

4.1 试验模型与试验方法

通过PSCAD(电力仿真软件)建立10 kV配电网模型, 如图4所示。在主变低压侧与10 kV母线之间设置电压及电流表计, 通过调节系统电源中各次谐波的含量来模拟系统中复杂的谐波源, 将电压与电流的波形记录下来后输入装置进行波形回放, 查看基波与各次谐波的计算误差以及电能累计的计算误差情况。

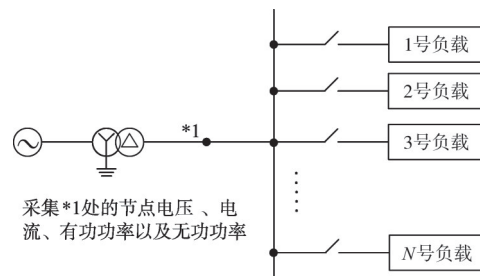


图4 试验模型

4.2 试验波形与结果

试验中施加电源电压构成下式:

$$u(t) = 50\sin 100\pi t + \sum_{n=2}^{13} 10\sin(100n\pi t + \frac{n\pi}{18}) \quad (12)$$

通过调整负载的不同阻抗特性, 营造不同的

负荷电流。通过仿真系统中表计的理论值与计量装置中的计算结果进行误差计算分析。

1)模拟负荷均为感性负载,且所有负载阻抗特性相同,得到电压与电流的波形如图5所示。

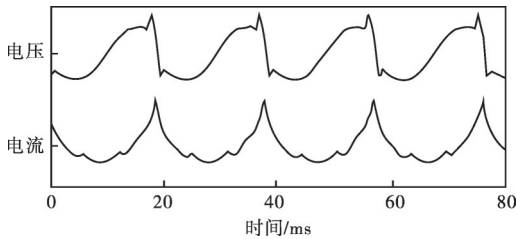


图5 1号试验电压与电流波形

试验结果如表1所示。

表1 1号试验电压与电流误差结果

谐波次数	电压			电流		
	理论值/V	装置显示值/V	误差/%	理论值/A	装置显示值/A	误差/%
基波	50.00	50.034	0.068	1.340	1.340	0
2	10.00	9.976	-0.048	—	0.54	—
3	10.00	9.974	-0.052	—	0.41	—
4	10.00	9.998	-0.004	—	0.12	—
5	10.00	9.983	-0.034	—	0.29	—
6	10.00	9.989	-0.022	—	0.36	—
7	10.00	9.978	-0.044	—	0.09	—
8	10.00	9.996	-0.008	—	0.14	—
9	10.00	9.990	-0.020	—	0.23	—
10	10.00	9.987	-0.026	—	0.17	—
11	10.00	9.978	-0.044	—	0.08	—
12	10.00	9.982	-0.036	—	0.18	—
13	10.00	9.986	-0.028	—	0.07	—
RMS	60.83	60.814	-0.032	1.624	1.623	-0.10

仿真系统中的功率表计仅能显示总功率的大小,无法显示各次谐波的有功功率与无功功率大小,因此将计量装置中的各次谐波功率叠加后的总功率与之相比较,效果相同。同时待系统运行稳定后,将装置清零电量后累计24h的电能计算值与理论值作误差计算,印证全能量电能计算方法的准确性。试验结果如表2所示。

2)模拟负荷互不相同,存在感性负载与容性负载,同时在上述电压源中增加高次谐波及间谐波源(590 Hz及60次谐波),得到电压与电流的波形如图6所示。试验结果如表3所示。

由试验结果可知,该方案中计量装置的电压

表2 1号试验功率误差结果

有功功率			无功功率		
理论值/W	装置显示值/W	误差/%	理论值/var	装置显示值/var	误差/%
88.790	88.712	-0.087	43.308	43.379	0.164
有功电能(运行24h)			无功电能(运行24h)		
理论值/Wh	装置显示值/Wh	误差/%	理论值/Varh	装置显示值/Varh	误差/%
2 130.96	2 129.03	-0.090	1 039.39	1 041.05	0.159

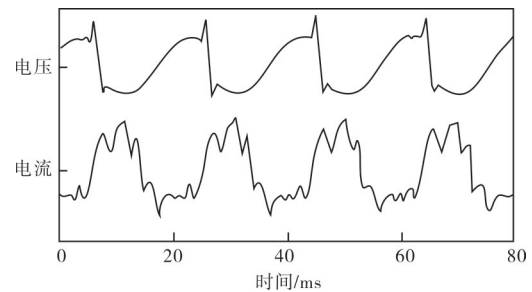


图6 2号试验电压与电流波形

表3 2号试验功率误差结果

有功功率			无功功率		
理论值/W	装置显示值/W	误差/%	理论值/var	装置显示值/var	误差/%
-93.772	-93.650	-0.130	-85.825	-85.721	0.121
有功电能(运行24h)			无功电能(运行24h)		
理论值/Wh	装置显示值/Wh	误差/%	理论值/Varh	装置显示值/Varh	误差/%
-2 250.53	2 246.34	-0.186	-2 059.80	-2 056.67	0.152

与电流的精度可以达到2%以内,功率及电能的精度可以达到5%以内,且对不同频带的信号可以实现自适应。

5 结语

本文提出了一种考虑了各类复杂谐波源的电网功率计算方法并通过试验验证了原理的正确性。该方案中通过丰富采样回路的多种滤波特性,对相同的电气信号进行相互独立的前置处理,经过不同处理后的信号服务于不同的功能模块,且各模块在同一个处理器中可以利用其他模块的计算结果。该方案在最大程度保留信号信息的完整性的同时,丰富计量装置功能,减少运算量,提高装置的效率与性能,有力地保证了电网电能计算的准确性与可靠性。

随着芯片技术的发展,计量装置已完全具备

高频采样的能力, 对于系统总电能的计算已经可以达到相当高的精度, 发电、供电及用电等多方利益都可以得到更多的保障。但如果系统中存在大量间谐波, 此时频率的跟踪及谐波功率计算都会受到影响, 因此对于电网间谐波含量的检测及处理是进一步需要研究和解决的问题。

参考文献

- [1] 胡龙, 王新梅, 卓燕平, 等. 含谐波源的功率计量方法研究[J]. 电力与能源, 2015, 37(2): 207-210.
- [2] 艾永乐, 郑建云. 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 16-22.
- [3] 马智泉, 查蕾, 胡淳, 等. 浙江省谐波污染源调查统计及分析[J]. 浙江电力, 2020, 39(11): 88-96.
- [4] 肖勇, 赵伟, 黄松岭. 基于离散傅里叶级数的非同步采样下谐波功率测量算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1570-1578.
- [5] 吴昊, 方旭光, 贾立忠, 等. 应用多级有源滤波系统的分布式电源谐波治理[J]. 浙江电力, 2020, 39(1): 35-40.
- [6] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 基于窗函数和谱线插值理论的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 78-88.
- [7] 华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值FFT谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 9-15.
- [8] 刘乾坤, 李宏伟, 许珉. 基于插值FFT算法重构的Hilbert变换测量无功功率的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 19-22.
- [9] 张鹏. 基于BP神经网络的谐波电能计量误差分析装置[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [10] 杨怀仁. 基于瞬时无功功率理论的三相谐波电流检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [11] 刘金强. 基于非整周期采样谐波有功功率计量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [12] 钱其. 电网谐波和间谐波功率的计量算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [13] 尹忠东, 魏文思, 王萍, 等. 考虑集肤效应和邻近效应的变压器绕组谐波损耗计算及实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 143-151.
- [14] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
- [15] 赵伟, 彭宏亮, 孙卫明, 等. 谐波条件下基于计量误差量化分析的电能计量方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 121-125.
- [16] 吕几凡, 胡璞俊, 沈建良, 等. 基于谐波电能表的电能计量模式探讨[J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 79-83.
- [17] 卜广金, 戴静, 李明, 等. 基于频率跟踪的定频采样测量算法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 68-70.
- [18] YAN C, TANG Y, DAI J F, et al. Uncertainty modeling of wind power frequency regulation potential considering distributed characteristics of forecast errors[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(22).
- [19] PILLAI A G, SAMUEL E R, UNNIKRISHNAN A. Optimal load frequency control through combined state and control gain estimation for noisy measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 5(24).
- [20] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
- [21] 刁依娜, 郭志红, 梁志瑞. 基于小波包变换的有功电能计量[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(2): 14-17.
- [22] 杨名, 陈红卫. 一种基于小波包和apFFT的间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 112-117.
- [23] 尤子龙, 徐璟, 张丛余, 等. 基于小波消噪法的电动汽车直流充电电能计量算法优化[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 15-19.
- [24] 陶顺, 郭傲, 刘云博, 等. 基于矩阵束和奇异值分解的间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 57-64.
- [25] 李军, 刘小壮, 张玉琼, 等. 基于自适应下垂算法的直流微电网功率精确分配和母线电压偏差优化控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021(3): 164-169.
- [26] 王民军, 李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020(4): 215-220.

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-01

作者简介:

王闰羿(1990), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护原理研究及装置应用开发工作。

(本文编辑: 徐 晗)