

# 一种基于实际工况的数字化电能表校验方法及其误差分析

寇英刚<sup>1</sup>, 范洁<sup>1</sup>, 杨世海<sup>2</sup>, 陈刚<sup>2</sup>, 胡琛<sup>3</sup>, 穆小星<sup>2</sup>, 徐敏锐<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;

2. 国家电网公司电能计量重点实验室(国网江苏省电力公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103;

3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**数字化电能表在实际工况下受到频率波动、谐波、输入噪声等因素影响,常出现误差超差的现象。为了研究现场实际工况下数字化电能表的计量性能,提出了一种基于实际工况的校验方法,研制了工况复现装置,推出了Blackman 离散傅里叶变换(DFT)+自适应线性(Adaline)神经网络算法,实现了标准电能的计算,并将该数字化电能表校验方法和瓦秒法进行了比较分析。误差分析结果表明基于实际工况的数字化电能表校验方法和瓦秒法均能用于校验数字化电能表,但是前者的测试结果波动更小,更加稳定,且能够为现场复杂工况下电能表性能评估提供参考。

**关键词:**数字化电能表;实际工况;校验;傅里叶变换;自适应线性神经网络

中图分类号:TM933

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)06-0053-05

## 0 引言

智能变电站利用电磁式互感及模拟量输入合并单元或电子式互感器作为信号传感单元, IEC 61850 标准作为通信协议, 数字化电能表作为计量单元, 实现了基于 IEC 61850 协议的数字计量系统<sup>[1-3]</sup>。数字化电能表作为数字电能计量系统的重要组成部分, 可应用于数字化变电站的贸易结算, 因此研究其计量性能具有重要意义。

理论上, 数字化电能表的准确性和可靠性较高。但实际上, 通过实验室检定的数字化电能表在现场运行时多次出现误差超差现象, 且数字化电能表的溯源方案暂无定论, 因此其还不具备贸易结算方面的应用条件<sup>[4-6]</sup>。由于数字化电能表是工作在频率波动、谐波、输入噪声等复杂工况下的高精度仪器, 实验室的模拟环境不能完全还原复杂的现场工况, 因此实验室测试得到的不超差数字化电能表, 在现场工况下的准确度还有待考核, 有必要对数字化电能表在现场工况下的误差状态进行评估。

目前广泛采用的数字化电能表校验方法均为虚负荷校验法, 包括标准数字表法、标准数字源法、标准模拟表法和瓦秒法<sup>[7-13]</sup>。标准表法将标准数字表和被校数字表的电能误差进行比较; 标准源法利用输出协议数据和高频标准电能脉冲对数字化电能表进行校验; 标准模拟表法利用信号调理单元、

协议转换单元和标准模拟表, 计算数字化表误差; 瓦秒法采用计算被校数字化电能表输出电能脉冲数并测量时间的原理, 计算被校表误差。然而, 上述数字化电能表校验方案尚未建立现场实际工况和被校数字化电能表误差之间的联系, 数字化电能表在现场实际工况下的误差特性研究还存在空白。

文中提出了一种基于实际工况的数字化电能表校验方法, 研制了工况复现装置, 并提出了 Blackman 离散傅里叶变换(DFT)+自适应线性(Adaline)神经网络算法, 实现了标准电能的计算。

## 1 校验方法的原理

校验方法的基本原理如图 1 所示。

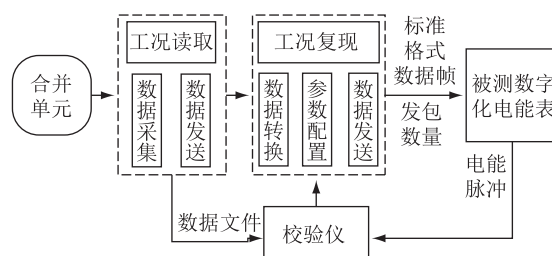


图 1 基于实际工况的校验方案原理

Fig.1 Calibration scheme for digital watt-hour meter using real load

工况读取模块接收合并单元输出的数据, 存储为自定义格式数据包; 工况复现模块将自定义格式数据包转换为标准格式数据包, 向被校表发包, 同时记录当前已发送数据包的数量; 被校表接收标准格式数据包后输出电能脉冲, 集成于校验仪的标准表, 同时计算标准电能数据, 两路数据进行比较, 得

收稿日期:2017-06-27;修回日期:2017-07-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901104);  
国家电网公司科技项目(5210EF17001M)

到被校表的误差。校验仪一方面接收实际工况读取模块的数据文件,另一方面利用反馈的数据包值截取数据文件进行电能计算。

电能脉冲计算原理如图 2 所示。在  $T_0$  时刻收到第一个脉冲,记录当前发包装置  $N_0$ ;在  $T_1$  时刻收到第二个脉冲,记录当前发包装置  $N_1$ ;在  $T_i$  时刻收到第  $i+1$  个脉冲,记录当前发包装置  $N_i$ 。利用数据文件中  $N_0 \sim N_i$  的原始数据进行计算,实现对数据文件的精确截取,标准通道和被校表用同一组数据进行电能计算,得出二者计算电能的误差,测试时间设为 5 min,数字化电能表的相对误差为:

$$\gamma = \frac{m_0 - m}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_0$  为标准数字化电能表算定的脉冲数; $m$  为被校数字化电能表脉冲数。

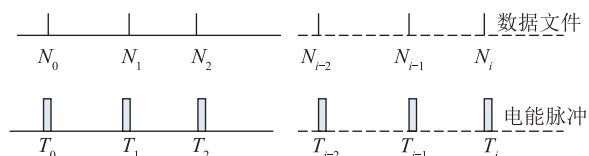


图 2 实际工况下电能脉冲计算原理  
Fig.2 Calculation principle of energy pulse under real load

## 2 校验方法的实现

### 2.1 工况读取模块

工况读取模块如图 3 所示,包括光纤收发器和计算机(PC机)。首先由光纤收发器(TP-LINK TR-932D)将合并单元光口发出的数据转化为电信号;其次与 PC 机的以太网口进行通信;最后 PC 机进行 IEC 61850-9-2 LE 协议数据帧的抓包、解析和提取工作,以自定义格式文件形式存储。为保证抓包不丢包和数据解析的完整性,工况读取模块软件基于 WinPcap 和 C 语言开发。模块工作流程为:初始化网卡并进行配置,建立合并单元和工况读取模块之间的通信;基于 pcap\_next\_ex 函数接收报文,读取报文中的 Ethertype 字段,判断报文类型;当报文类型为 88BA 时,读取报文中应用协议数据单元(APDU)内容,并对其中的计量用通道进行识别;最后将计量用通道的数据保存为自定义格式数据。

### 2.2 工况复现模块

工况复现模块如图 4 所示。自定义格式数据在该模块中添加目的地址、源地址、采样值标识 ID (SVID) 等 IEC 61850-9-2 LE 协议相关参数,转换为标准格式后等间隔发包(4 kHz)。

该模块设计基于现场可编程门阵列(FPGA)板和

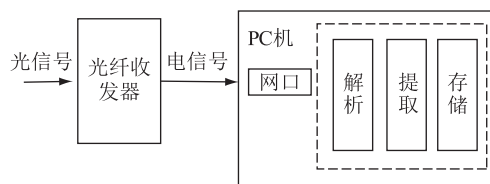


图 3 工况读取模块

Fig.3 Real load reading module

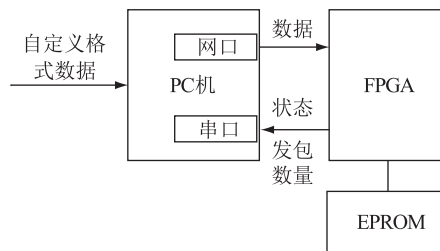


图 4 工况复现模块

Fig.4 Real load reconstruction module

PC 机。FPGA 板为 Altera Cyclone II EP4CE15F17C8N 系列。FPGA 板外部扩展一个电可编程只读存储器(EPROM),FPGA 板和 PC 机之间通过一个串口和一个 100 M 网口连接,实现双向通信。在 PC 机组帧完毕后,千兆网口发送符合 IEC 61850-9-2 LE 协议的数据包,串口用于 FPGA 向 PC 机反馈存储状态和发包数量。当 EPROM 储存数据包不足时,FPGA 向 PC 机反馈储存不足,PC 机停止发送 IEC 61850-9-1/2 协议数据包进行储存,否则继续数据包发送。

### 2.3 校验仪

校验仪如图 5 所示。由 PC 机完成被校数字电能表电能和标准数字电能之间的计算与比较工作。工况读取模块、复现模块、校验仪共用一台 PC 机。PC 机的 CPU 为 Intel core i5-4460,存储容量为 500 GB。PC 机除了工况读取模块和工况复现模块的接口外,还扩展脉冲采集板,获取被校数字化电能表的电能脉冲,并计算被校通道电能。当合并单元数据速率为 8 Mbit/s 时,数据存储时间可达 138 d。

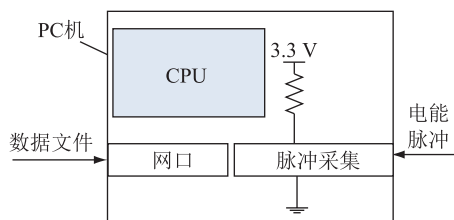


图 5 校验仪

Fig.5 Calibration instrument

## 3 标准数字电能计量算法

为实现标准电能的计算,文中提出 Blackman

DFT+ Adaline 神经网络算法。Blackman DFT 算法应用较广<sup>[14]</sup>,因此文中主要对 Adaline 神经网络进行分析。

在实际工况下电网中含有各次谐波,电网波形可以表示为周期信号:

$$x(t) = \sum_{k=0}^m A_k \sin(2\pi k f_0 t + \varphi_k) \quad (2)$$

式中:  $A_k$  为信号幅值;  $k$  为谐波次数;  $m$  为最高谐波次数;  $f_0$  为电网基波频率;  $\varphi_k$  为初相位。将式(2)离散化后得到表达式(3):

$$x(n) = d_0 + \sum_{k=1}^m [a_k \cos(k\omega_0 n) + b_k \sin(k\omega_0 n)] \quad (3)$$

式中:  $n$  在  $0 \sim (N-1)$  间取值,  $N$  为采样点数;  $d_0$  为直流分量;  $a_k = A_k \sin \varphi_k$ ;  $b_k = A_k \cos \varphi_k$ ;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。只要得到  $a_k$  和  $b_k$  的值,就可以求出各次谐波的幅值和相角。

Adaline 神经元结构原理如图 6 所示。其中  $x_{1n} \sim x_{kn}$  为 Adaline 神经元在  $n$  时刻的输入信号,取其向量形式为  $\mathbf{X}_{in} = [x_{0n}, x_{1n}, \dots, x_{kn}]^T$ ,对应同一时刻每一个输入信号都有一个相应的权值,取其向量形式为  $\mathbf{W}_{in} = [w_{0n}, w_{1n}, \dots, w_{kn}]^T$ 。Adaline 神经元的输出为:

$$\tilde{y}_n = \mathbf{X}_{in}^T \cdot \mathbf{W}_{in} \quad (4)$$

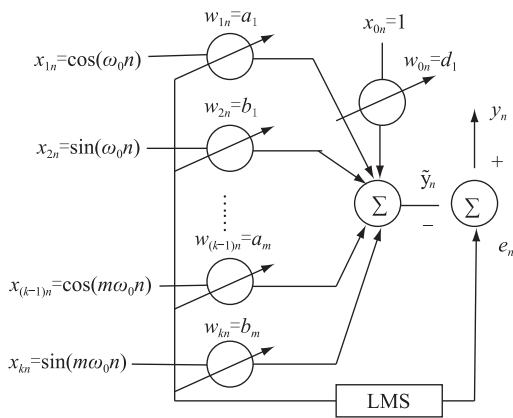


图 6 Adaline 神经元结构原理  
Fig.6 Adaline neuron structure

工作原理为:将 Adaline 神经元输出信号  $\tilde{y}_n$  与理想的响应信号  $y_n$  做比较,得出两者的差值  $e_n$ ,并将差值经最小均方差(LMS)算法调整权向量后,送入神经元中进行训练学习,使得神经元最后输出信号与理想信号之间的误差最小或相一致。权向量的学习公式为:

$$\mathbf{W}_{i(n+1)} = \mathbf{W}_{in} + \eta e_n \mathbf{X}_{in} \quad (5)$$

式中:  $\eta$  称为步长,也称学习速率,  $0 < \eta < 1$ 。

在进行谐波分析时取基波频率  $f_0$  为已知,即基波角频率  $\omega_0 = 2\pi f_0$  已知。初始值取:

$$\begin{cases} \mathbf{W}(0) = [0, 0, \dots, 0]^T \\ \mathbf{X}(n) = [1, \sin(\omega_0 n), \cos(\omega_0 n), \dots, \\ \sin(m\omega_0 n), \cos(m\omega_0 n)]^T \end{cases} \quad (6)$$

利用式(4)、式(5)完成学习过程,使得  $e_n$  达到最小,  $\tilde{y}_n$  逼近采样值  $y_n$ ,得到权值  $a_m$  和  $b_m$ ,即可以算出各次谐波的准确幅值和相位,从而提高误差计算的准确度。

校验仪采集数字电能表输出的脉冲时间间隔为  $t$ ,采用时间-数字转换(TDC)技术,将时间  $t$  与数字功率源输出数据频率  $f$  作乘积,取整得到时间间隔  $t$  内数字功率源输出的点数  $N$ ,将抓包程序解出的数据截取  $N$  个数据点,对  $N$  个数据点利用文中算法解析出数据波形中基波、谐波、频率数据及  $N$  点的功率。

将文中算法与常规 DFT 算法和插值 4 阶卷积窗 DFT 算法<sup>[15-17]</sup>进行比较,计算数字电能计量的误差计算。电压/电流有效值均取 1,功率因素为 1.0,基波频率为 50 Hz,对输入噪声、频率偏差、谐波等因素进行误差仿真,仿真次数为 10,表 1 为仿真结果的平均值。

表 1 算法误差仿真结果

算法	测试项目		
	噪声	频率偏差	谐波
文中算法	$3.14 \times 10^{-4}$	$-2.52 \times 10^{-7}$	$-2.62 \times 10^{-7}$
常规 DFT	$4.34 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-5}$	$-1.06 \times 10^{-5}$
插值 DFT	$2.09 \times 10^{-3}$	$4.52 \times 10^{-7}$	$2.05 \times 10^{-7}$

可知:(1) 输入噪声误差仿真时,在基波上叠加了高斯白噪声,信噪比为 30 dB,误差为随机性误差,仿真结果中最大误差为  $10^{-4}$  数量级,误差几乎为零,可以忽略;(2) 频率偏差误差仿真时,频率值取 50.5 Hz,频率偏差为 0.5 Hz,误差为  $10^{-7}$  数量级,误差较小,可以忽略;(3) 谐波误差仿真时,取 2~11 次谐波共同叠加至基波中,按照电能质量公用电网谐波国家标准中的规定对谐波允许值进行取值,取偶次谐波为基波的 0.8%,奇次谐波为基波的 1.6%,电压总谐波畸变率为:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{11} (U_h)^2}}{U_1} = 4\% \quad (7)$$

式中:  $h$  表示基波以上的各次谐波次数,电流以相同方法进行取值,仿真误差为  $10^{-7}$  数量级。

由结果可见:常规 DFT 算法在频率偏差、谐波

情况下误差较大;插值 DFT 算法和文中算法的计算结果比较接近,但是信号叠加噪声工况下的误差较大;文中提出的数字电能计量算法在各种复杂实际工况下,均能准确的进行电能计量。

#### 4 校验方法的验证

为验证文中校验方法的可行性,采用瓦秒法和文中方法对同一块 0.2 s 级的数字电能表进行校验。电能计算均采用点积和算法,取连续测试的 10 个脉冲作为测试结果,均值计算结果如表 2 所示。

表 2 测试结果

Table 2 The experimental results %

测试方法	误差平均值	方差 $\times 10^{-9}$
瓦秒法	-0.012 9	365
文中方法	-0.015 8	1.34

测试结果的不确定度来源包括:(1)多次重复测量引起的不确定度;(2)标准装置误差引起的不确定度;(3)测试结果修约引起的不确定度。其中(1)为 A 类不确定度( $U_A$ ), (2)和(3)为 B 类不确定度( $U_B$ )。采用瓦秒法和文中校验法测试得到的  $U_A$  分别为  $6.04 \times 10^{-4}$  和  $0.36 \times 10^{-4}$ 。校准装置准确度为 0.05%,按均匀分布考虑,包含因子为 $\sqrt{3}$ ,则由校准装置引入的不确定度为  $2.89 \times 10^{-4}$ 。对电能表误差修约可能引起的最大误差为 0.01%,按均匀分布考虑,则由修约导致的不确定度为  $0.58 \times 10^{-4}$ 。

$U_A$  与  $U_B$  之间无相关关系,利用  $U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$  计算合成不确定度。最终得到采用瓦秒法和文中校验法测试的扩展不确定度  $U$  (包含因子  $k=2$ ) 分别为  $13.44 \times 10^{-4}$  和  $5.94 \times 10^{-4}$ 。

采用瓦秒法测试数字化电能表的误差和采用基于实际工况的校验方法测试误差的均值基本相同。但是瓦秒法不确定度较大,而基于实际工况的校验方法测试精度高,误差波动小。试验表明了该校验方法检定数字化电能表的有效性和可行性。

#### 5 结语

文中分析了数字化电能表校验方案,研究了基于实际工况的数字化电能表校验方法,研制了工况复现装置,提出了 Blackman DFT+Adaline 神经网络算法计算标准电能,并和瓦秒法进行了比较。研究和试验结果表明:(1)基于实际工况的校验方法可用于重建现场工况,评估复杂环境下数字化电能表的计量性能;(2)与瓦秒法测试结果相比,该校验方

案测试结果的波动较小,稳定性较高。

#### 参考文献:

- [1] 艾兵,江波. 数字电能计量及其电能表检测技术[J]. 四川电力技术,2011,34(2):10-13,17.  
AI Bing, JIANG Bo. Digital electric energy metering and its detection technique [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2011,34(2):10-13,17.
- [2] 王忠东,李红斌,程含渺,等. 模拟量输入合并单元计量性能测试研究[J]. 电网技术,2014,38(12):3522-3527.  
WANG Zhongdong, LI Hongbin, CHENG Hanmiao, et al. Metering performance test of analog-input merging unit [J]. Power System Technology, 2014,38(12):3522-3527.
- [3] 程含渺,徐晴,纪峰,等. 一种用于电子式互感器相位补偿的数字移相方法[J]. 电力工程技术,2017,36(2):82-87.  
CHENG Hanmiao, XU Qing, JI Feng, et al. A digital phase-shift method for phase compensation of electronic instrument transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2):82-87.
- [4] 谢东,吴涛,吴伯华,等. 数字量输入电能表误差等级问题的探讨[J]. 电测与仪表,2011(8):87-91.  
XIE Dong, WU Tao, WU Bohua, et al. Discussion on accuracy class issue for digital interface electricity meter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011(8):87-91.
- [5] 张秋雁,魏伟,李红斌. 基于 IEC 61850 标准的数字化电能表丢帧误差分析[J]. 电测与仪表,2016,53(24):56-60.  
ZHANG Qiuyan, WEI Wei, LI Hongbin. Frame loss error analysis of digital Watt-hour meter based on IEC 61850 [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016,53(24):56-60.
- [6] 段梅梅,吴伟将,纪峰,等. 频率偏移对数字化电能表计量误差影响分析[J]. 电测与仪表,2016,53(S1):63-66.  
DUAN Meimei, WU Weijiang, JI Feng, et al. Research on influence of frequency deviation on digital input electricity meters [J]. Electrical Measurement & Instrumentation. 2016, 53(S1):63-66.
- [7] 李前,章述汉,陆以彪,等. 数字电能计量系统现场检定技术研究[J]. 电测与仪表,2010,47(10):25-28.  
LI Qian, ZHANG Shuhan, LU Yibiao, et al. The Study of on-site metering and calibration of fully digital power metering system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation. 2010, 47(10):25-28.
- [8] 杨华云,艾兵,江波,等. 数字电能表现场校验仪的研制[J]. 电测与仪表,2013,50(6):53-57.  
YANG Huayun, AI Bing, JIANG Bo, et al. Development of the field tester for digital electricity meter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013,50(6):53-57.
- [9] 张健,穆小星,段梅梅. 一种小模拟量输入电能表检定装置的研制[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):55-57.  
ZHANG Jian, MU Xiaoxing, DUAN Meimei. Development of a small analog input testing equipment for electricity meter [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(2):55-57.
- [10] 唐毅,江波,李红斌,等. 数字电能计量系统检定方法综述[J]. 电工技术学报,2013,28(S2):372-377.  
TANG Yi, JIANG Bo, LI Hongbin, et al. Survey on the verifi-

- cation methods for digital electrical energy metering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 372-377.
- [11] 林伟斌, 陈 奎, 肖 勇, 等. 电能表现场校验技术研发应用现状及其发展趋势(上)[J]. 电测与仪表, 2016, 53(12): 1-6, 41.  
LIN Weibin, CHEN Lei, XIAO Yong, et al. Current research status and trend of on-site calibration of Watt-hour meters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation. 2016, 53(12): 1-6, 41.
- [12] 林国营, 周尚礼, 孙卫明, 等. 数字化变电站电能计量装置检验技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 145-148.  
LIN Guoying, ZHOU Shangli, SUN Weiming, et al. Calibration technology of non-traditional electric energy measuring equipment in digitalized substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA. 2011, 23(3): 145-148.
- [13] GB/T 17215.303—2013 交流电测量设备 特殊要求 第3部分: 数字化电能表[S]. 2013.  
GB/T 17215.303—2013 Electric metering equipment (AC) particular requirements part 3: digital input electricity meters [S]. 2013.
- [14] 许 珉, 张文强, 王兆强, 等. 基于加窗递推 DFT 算法的快速相位差校正法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 1-4.  
XU Min, ZHANG Wenqiang, WANG Zhaoqiang, et al. Fast phase difference correction method by using recursive DFT with blackman-harris window[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 1-4.
- [15] ZHANG F, GENG Z, YUAN W. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 160-164.
- [16] QIAN H, ZHAO R, CHEN T. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1064-1069.
- [17] 王 平, 丁 力. 加窗插值 FFT 的电网谐波分析算法研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(2): 46-50.  
WANG Ping, DING Li. Power system harmonic measurement analysis based on windows and interpolated FFT [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(2): 46-50.

## 作者简介:



寇英刚

寇英刚(1974—),男,天津人,硕士,高级工程师,从事电能计量管理工作(E-mail:Ying-gang\_kou@qq.com);

范 洁(1977—),女,江苏南通人,硕士,教授级高级工程师,从事电能计量检测与管理工作(E-mail:fanjie125@163.com);

杨世海(1976—),男,江苏徐州人,硕士,教授级高级工程师,从事电子式互感器、数字化电能计量研究工作(E-mail:ysh.young@163.com);

陈 刚(1984—),男,湖北黄梅人,硕士,高级工程师,从事电子式互感器、数字化电能计量研究工作(E-mail:cg09\_jsepr@sina.com);

胡 琛(1986—),男,江西南昌人,博士研究生,研究方向为电子式互感器状态评估、数字化电能计量系统仿真平台研发(E-mail:huchena@126.com);

穆小星(1963—),男,江苏南京人,硕士,教授级高级工程师,从事电气自动化测试与研发工作(E-mail:m139129@163.com);

徐敏锐(1976—),男,江苏淮安人,硕士,教授级高级工程师,从事互感器现场检测、数字化电能计量研究工作(E-mail:xuminrui18@163.com)。

## A Calibration Method and Error Analysis of Digital Energy Meter Based on Actual Working Condition

KOU Yinggang<sup>1</sup>, FAN Jie<sup>1</sup>, YANG Shihai<sup>2</sup>, CHEN Gang<sup>2</sup>, HU Chen<sup>3</sup>, MU Xiaoxin<sup>2</sup>, XU Mingrui<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. State Grid Key Laboratory of Energy Metering(State Power Research Jiangsu Electric Power Company Institute), Nanjing 211103, China; 3. SSEE of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Digital energy meters often appear error phenomenon in the actual working conditions such as frequency fluctuations, harmonics, input noise and other factors. In order to study the measurement performance of the digital energy meter under the actual working conditions, a calibration method based on the actual working condition is presented. A condition recovery device is developed. A Blackman discrete Fourier transform (DFT) + adaptive linear (Adaline) neural network algorithm is proposed. The calculation of standard electrical energy is achieved. The digital energy meter calibration method and the wattage-second method are compared and analyzed. The results of error analysis show that the digital energy meter calibration method based on the actual working conditions and the wattage-second method can be used to verify the digital energy meter. But the test results of the former are smaller and more stable, and can provide reference for the performance evaluation of the energy meter under complex conditions.

**Key words:** digital watt-hour meter; actual working condition; calibration; DFT; Adaline neural network

(编辑 方 晶)