

并网光伏数据采集系统设计及误差修正

李 民 朱翔鸥 章上聪

(温州大学浙江省低压电器智能技术重点实验室 温州 325000)

摘要: 开发了一套具备数据采集、分析处理、测量结果校准等功能的太阳能并网光伏数据采集系统。为解决零点漂移、元器件非线性等因素造成的测量误差,论文提出了一种基于分段最小二乘法的数据校准算法。通过计量标准表建立光伏数据采集系统的标准值,利用分段最小二乘拟合法对系统测量结果进行校准,由标准测量值与校准值相比,判断系统是否达到设计要求。实验结果表明,基于分段最小二乘拟合法可以有效补偿系统的测量误差,与未经校准的测量数据对比发现,所设计的光伏并网数据采集系统和校准算法,将测量误差减小了89.6%,测量精度得到有效提高。

关键词: 数据采集系统;测量误差;校准;最小二乘法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

The design of Grid photovoltaic data acquisition system and error correction

Li Min Zhu Xiang'ou Zhang Shangcong

(The Key Laboratory of Low-Voltage Apparatus Intellectual Technology of Zhejiang, Wenzhou 325000, China)

Abstract: The thesis developed a set of Photovoltaic solar power grid data acquisition system which includes functions of data acquisition, analysis & process and measurement correction. In order to solve the measurement error caused by zero drift and nonlinear characteristics of components, thesis proposed a kind of data calibration algorithm based on sector least square method. It set up the standard values of photovoltaic data acquisition system by measurement standard table, do measurement calibration for system by Piecewise least squares fitting method, and decide whether system meets design requirements by comparing Standard to measure value and calibration value. The experimental results indicate that Piecewise least squares fitting method can compensate the measurement error of the system effectively, The measurement error has been reduced 89.6% after using Grid-connected PV data acquisition system and calibration algorithm compared with metrical date without calibration, measurement accuracy been improved effectively.

Keywords: data acquisition system; measurement error; calibration; least square method

1 引言

太阳能并网光伏系统的整体优化是提高太阳能资源利用率的重要手段之一,而优化方案的提出必须要有准确、全面的系统运行数据作为支撑,因此,设计能够满足数据全面性、实时性以及高精度要求的太阳能并网光伏数据采集系统就显得尤为重要^[1]。因此,很多学者在太阳能数据采集技术做了大量的工作。

文献[2]基于RS 232、RS 485和以太网通信接口建立了一套可以对太阳能发电系统中重要数据进行监控的数据采集系统。文献[3]基于虚拟平台建立了一种具有数据采集和保存功能的太阳能光伏系统,实现了对光伏发电系统的实时监控。文献[4]基于STM32建立了电力数据采集

系统,该系统利用了STM32内部的ADC,无需外扩复杂的外围电路,具有低功耗、廉价、高性能等特性。文献[5]在LabVIEW平台下,基于ActiveX技术、通知技术、事件驱动、ADO技术,建立了太阳能数据监测系统;

以上学者所建立的系统都能实现对太阳能光伏发电系统的监控,达到了对太阳能光伏发电系统的输出特性的分析和研究提供数据支持等目的。然而,采集系统存在一定的线性或者非线性误差,以上学者对系统误差所进行修正的工作做的比较少,因此,采用合理的方法来补偿测量误差是很有必要的,也是行之有效的方法^[6]。

本文基于最小二乘拟合法,对本文所建立的太阳能并网光伏数据采集系统进行系统误差的校准,经过校准后,系统测量误差可以有效地减小,精度和稳定度大大提高,为获

取太阳能并网光伏系统检测数据的准确性提供了保证。

2 系 统

本采集系统主要由模拟量输入(输入直流电压、输入直流电流、输出交流电压和输出交流电流)、高电压隔离电路、小信号放大电路、主控芯片 STM32F103RBT6 模块、串口通信模块以及上位机人机交互模块组成,其系统总体结构框图如图 1 所示。

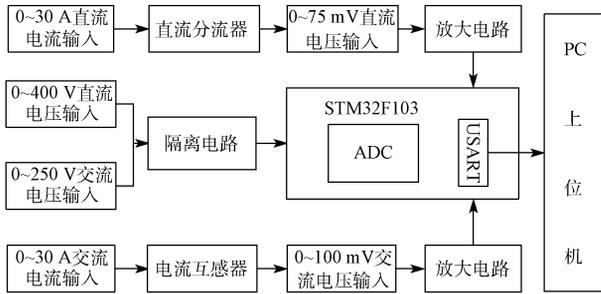


图 1 系统总体结构框图

2.1 系统硬件设计

2.1.1 电压信号的采集

在电气测量与控制中,常常需要用低压器件去测量、控制高电压、强电流等模拟量,如果模拟量与数字量之间没有电气隔离,那么,高电压、强电流就会很容易串入低压器件,并将其烧毁。本系统采集的信号为高电压信号和大电流信号,因此,设计合理的隔离电路将高压信号调理到满足单片机 ADC 输入范围的电压信号极为重要。基于 HCNR200 的隔离电路如图 2 所示。 R_3 、 R_4 、 R_5 以及 $TL431$ 组成基准源电路,为输入信号提供一个偏置电压 V_{REF} 。 R_1 和 R_2 组成分压电路,使得 R_1 两端的电压满足运放的输入要求。设隔离电路的输入电压为 V_{in1} ,运放 $U2A$ 的输出端为 V_{in2} ,输出信号为 V_{out} ,则由 HCNR200 的工作原理和隔离电路原理图可知:

$$V_{out}/V_{in2} = (R_{13} \cdot I_{PD2}) / (R_7 \cdot I_{PD1}) \approx R_{13}/R_7 \quad (1)$$

由式(1)可知,隔离电路在各种参数设置合理的情况下,电压增益只与电阻 R_{13} 和 R_7 有关,与 HCNR200 的电流传输特性无关。

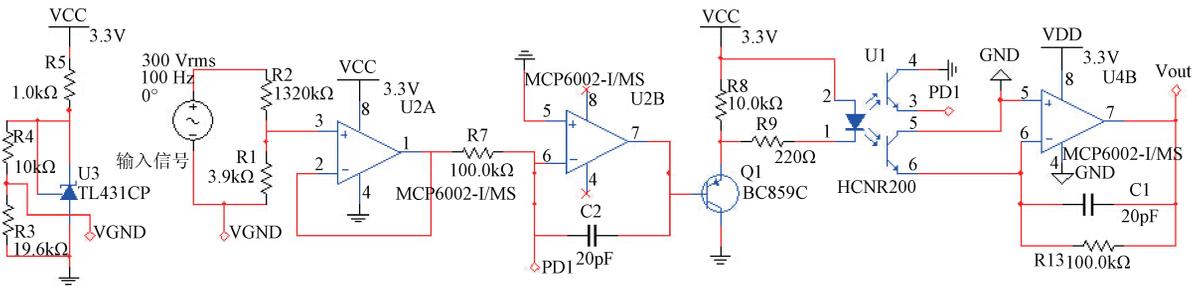


图 2 基于 HCNR200 的隔离电路

2.1.2 电流信号的采集

电流信号输入范围是 0~30 A,单片机无法直接测量,输入直流电流信号通过在输入回路中串联一个直流分流器,采样分流器两端电压信号(0~75 mV)来获取;输出交流电流信号通过互感器感应出 0~100 mV 的电压信号来获取,因此,设计信号放大电路使小信号放大到满足单片机 ADC 输入范围的电压信号是很有必要的^[7],小信号放大电路如图 3 所示由运放的虚短和虚断可得:

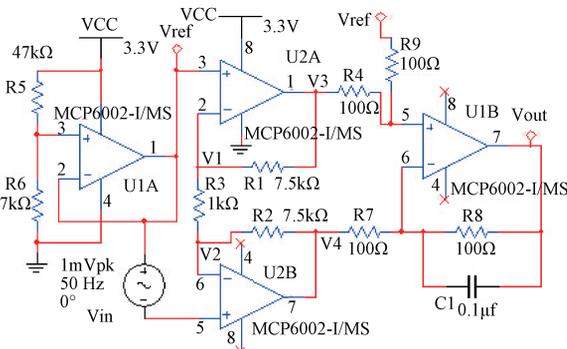


图 3 小信号放大电路图

$$V_{out} - V_{ref} = \frac{R_8}{R_7} \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} \cdot V_{in} \quad (2)$$

由式(2)可知,当 R_7 、 R_8 、 R_1 和 R_2 为定值时,改变电阻 R_3 的值,即可改变电路的整个电压增益。

2.1.3 串口通信电路的设计

本系统与上位机之间的通信采用串口通信,由于 RS232 标准电平采用负逻辑,即逻辑“0”表示 3~15 V,逻辑“1”表示 -15~-3 V,并且只有当传输电平的绝对值大于 3 小于 15 V,电路信号才能够被检测出来,因此,微处理器与上位机不能直接相连,必须进行电平转换。本系统采用的电平转换芯片是 MAX3232,可同时完成数据的收发转换。串口通信电路连接如图 4 所示。

2.2 系统软件的设计

2.2.1 单片机程序的设计

根据本系统的设计要求,STM32 单片机主要完成模拟信号的采集、数据滤波处理、电压有效值的计算、串口与 PC 机的通信。其软件设计流程图如图 5 所示。

2.2.2 上位机 LabView 程序的设计

本系统的上位机软件主要实现各种参数的设置、电量

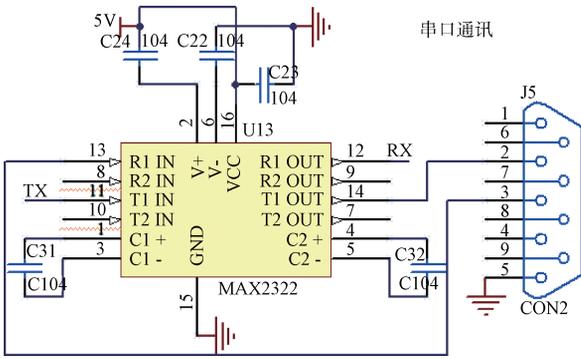


图 4 串口通信电路

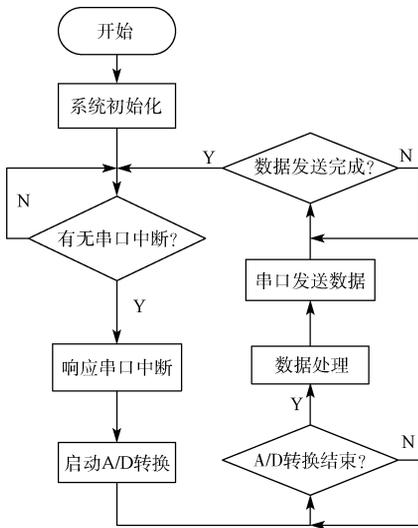


图 5 STM32 单片机软件设计流程图

参数的实时显示、数据分析处理、数据保存和数据回放等功能。上位机软件的程序流程图如图 6 所示^[7]。

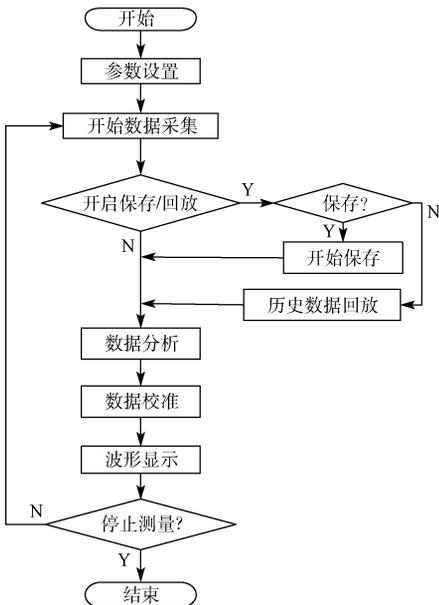


图 6 上位机软件的程序流程

3 分段最小二乘曲线拟合

3.1 系统的误差分析

由测量误差的大小可衡量测量系统的好坏,判断当前测量系统是否满足设计需求。本采集系统存在的线性或者非线性误差主要有电路的增益与设计增益不相等,电路中不可避免的存在零点漂移、元器件本身存在非线性,电路中存在的各种噪声和电磁干扰,A/D 转换误差等等。由于这些误差的存在,使得采集值与被测量值并不相等,存在较大的误差。为了提高采集系统的准确性,需要对采集系统在上位机进行数据校准,本系统采用分段最小二乘原则进行数据拟合^[8-9]。

3.2 多项式最小二乘拟合

给定一组基点 $x_1 < x_2 < \dots < x_m$ 以及对应于基点的函数观测值 y_1, y_2, \dots, y_m 寻找一 $n (n < m)$ 次多项式^[10-11]:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = \sum_{j=0}^n a_jx^j \quad (3)$$

使 $f(a) = \sum_{i=1}^m (y(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=1}^m (\sum_{j=0}^n a_jx_i^j - y_i)^2$ 最小,即有 $\frac{\partial f(a)}{\partial a_k} = 0, (k=0, 1, 2, \dots, n)$,即得到正规方程组:

$$\sum_{j=0}^n a_j \sum_{i=1}^m x_i^{j+k} = \sum_{i=1}^m y_i x_i^k \quad (4)$$

式中: $(k=0, 1, 2, \dots, n)$,特殊地,若把 x_1, x_2, \dots, x_m 分别作为第 $1, 2, \dots, m$ 个采样时刻, y_1, y_2, \dots, y_m 分别作为对应时刻的测量值,其中第 i 个时刻的采样值为 y_i ,即:

$$y_1 = y(1), y_2 = y(2), \dots, y_i = y(i), \dots, y_m = y(m)$$

$$\text{记: } \mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_n]^T, \mathbf{r}(x) = [1, x, x^2, \dots, x^n]^T, \text{则式(1)可记为:}$$

$$y(x) = \mathbf{a}'\mathbf{r}(x) \quad (5)$$

则由式(2)可以得到 \mathbf{a} 的最优估计:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{R}' \cdot \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}'\mathbf{y} \quad (6)$$

式中^[9]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}(1)' \\ \mathbf{r}(2)' \\ \vdots \\ \mathbf{r}(m)' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1^2 & \dots & 1^n \\ 1 & 2 & 2^2 & \dots & 2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & m & m^2 & \dots & m^n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(m) \end{bmatrix}$$

通过式(4)对测量数据进行拟合,得到变量在各采样点处的回归值,并代替原测量值可以去噪。考虑到系统的简单性和鲁棒性, n 不宜取值过大,通常,选取 $n \leq 3$ 。但是如果用单个多项式去拟合观测窗口内数据点是不准确的,有可能带来信息失真,所以本系统考虑进行分段拟合。

3.3 分段加权叠加

把采样数据点分成 l 组: DATA1, DATA2, ..., DATA i , ..., DATA l , 然后分别对每组数据进行拟合, 并且保证前后 2 组数据边界条件的连续性和平滑性。边界条件的连续性是指上一段曲线的终点值等于下一段曲线的起始值, 平滑性指曲线连边界点处一阶导数相等。为了满足边界条件, 将数据进行重叠加权处理。对各数据段先进行拟合, 然后对重叠数据进行加权叠加。

$$\hat{y}(x) = \begin{cases} \hat{y}_i(x), & x_{i,1} \leq x \leq x_{i,n_i-\tau_i+1} \\ \omega_i \hat{y}(x) + \bar{\omega}_i y_{i+1}(\hat{x}), & x_{i,n_i-\tau_i+1} \leq x \leq x_{i,n_i} \end{cases} \quad (7)$$

式中: τ_i 为数据段 DATA i 和 DATA $i+1$ 的重叠数据个数, 且 $\tau_i < n_i/2 - 1, (i=1, 2, \dots, l-1)$ 。当 x 为 DATA i 和 DATA $i+1$ 的重叠数据段中第 k 个采样数据时:

$$\omega_i(k) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{k-1}{\tau_i-1}\pi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

$$\bar{\omega}_i(k) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{k-1}{\tau_i-1}\pi + \frac{\pi}{2}\right), 1 \leq k \leq \tau_i \quad (9)$$

即对某一段的数据的后段的重叠数据加权值从 1 变化到 0, 下一段数据的前段重叠数据加权值从 0 变化到 1。

通过对采样数据进行分段加权拟合, 便可得到其连续的拟合信号 $f(t)$ 。同时可以求得在采样时刻的一阶导数值。再用同样的方法对一阶导数值进行加权拟合, 可以得到一阶导数信号 $f'(t)$, 同理可以得到其二阶导数信号 $f''(t)$ 。

4 系统校准

4.1 校准拟合函数的实现

LabVIEW 的 Curve Fitting 工具包提供了线性拟合、指数曲线拟合、多项式拟合、最小二乘拟合以及多项式插值和样条插值等方法。利用 LabVIEW 的这些模块, 可以很方便的实现自己所要求的拟合曲线^[10]。

本次拟合函数实现的程序设计前面板主要包括两个部分: 输入控制部分和输出部分。输入控制部分主要包括原始数据的输入及拟合曲线的选择(包括线性拟合、多项式拟合、指数拟合和幂函数拟合)和拟合方法的选择; 输出部分主要包括拟合曲线图形显示、数值显示和最终拟合函数的显示。

4.2 校准结果

本采集系统以 6 为半数字万用表测量的电压值为实际电压值, 以 0.2 级的精密电流表测量的电流为实际电流值, 设用计量过的标准表测量的实际输入电压、输入电流、输出电压和输出电流分别为 u_{DC} 、 i_{DC} 、 u_{AC} 和 i_{AC} 系统未校准时测量值分别为 u'_{DC} 、 i'_{DC} 、 u'_{AC} 和 i'_{AC} , 经分段最小二乘拟合法校准后测量值分别为 u''_{DC} 、 i''_{DC} 、 u''_{AC} 和 i''_{AC} , 测得数据采集系统的输入电压的 u_{DC} 、 u'_{DC} 和 u''_{DC} 如图 7 所示, 校准前和校准后输入电压的相对误差如图 8 所

示; 输入电流的 i_{DC} 、 i'_{DC} 和 i''_{DC} 如图 9 所示, 校准前和校准后输入电流的相对误差如图 10 所示; 输出电压的 u_{AC} 、 u'_{AC} 和 u''_{AC} 如图 11 所示, 校准前和校准后输出电压的相对误差如图 12 所示; 输出电流的 i_{AC} 、 i'_{AC} 和 i''_{AC} 如图 13 所示, 校准前和校准后输出电流的相对误差如图 14 所示。由图 7~图 14 可得: 系统在未校准前的相对误差较大且不稳定, 精度较差; 系统校准后相对误差小、稳定性较好, 精度大大提高, 可见, 基于最小二乘原则的分段线性拟合法可以有效提高系统的精度, 减小测量误差, 有一定的实用价值, 可广泛应用于数据采集或测量系统。

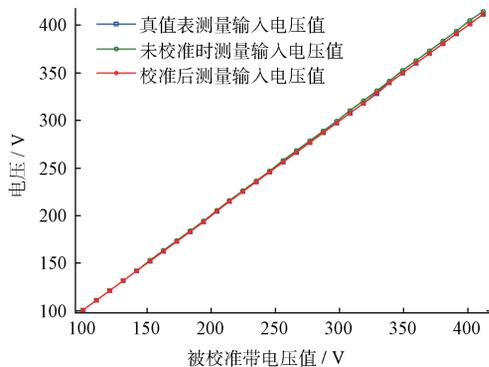


图 7 输入电压的 u_{DC} 、 u'_{DC} 和 u''_{DC}

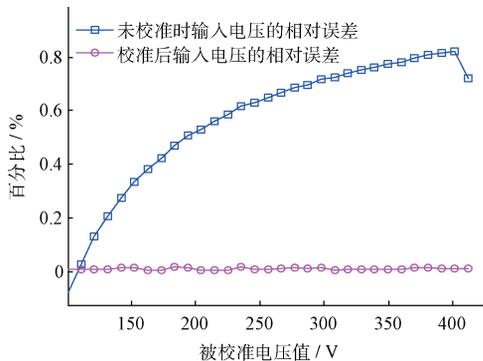


图 8 未校准时和校准后输入电压的相对误差

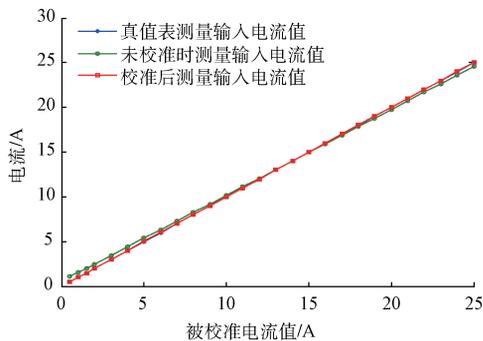


图 9 输入电流的 i_{DC} 、 i'_{DC} 和 i''_{DC}

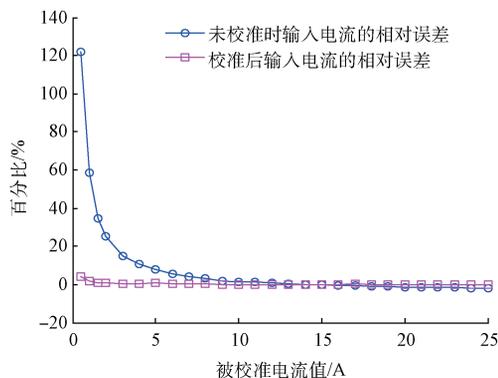


图 10 校准前和校准后输入电流的相对误差

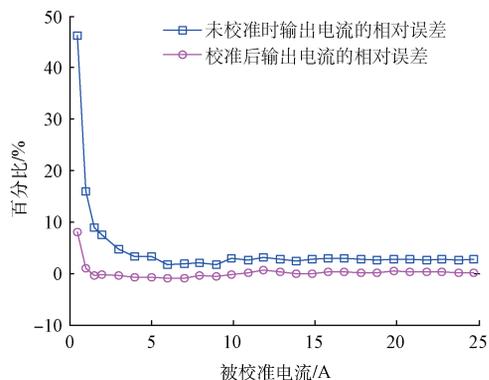


图 14 校准前和校准后输出电流的相对误差

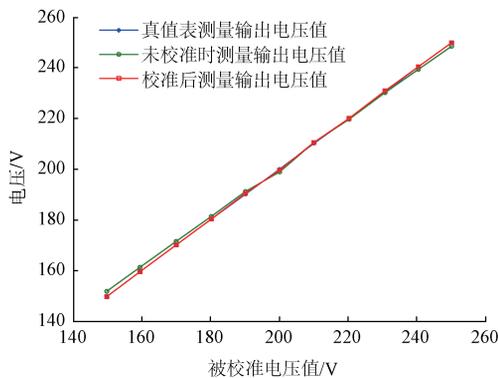
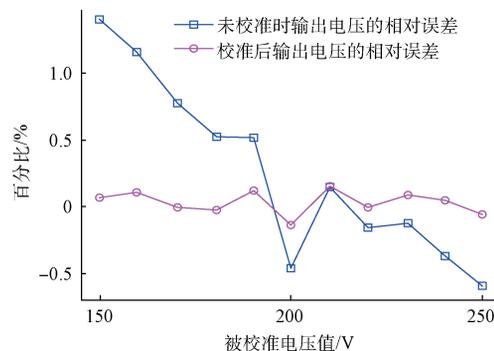
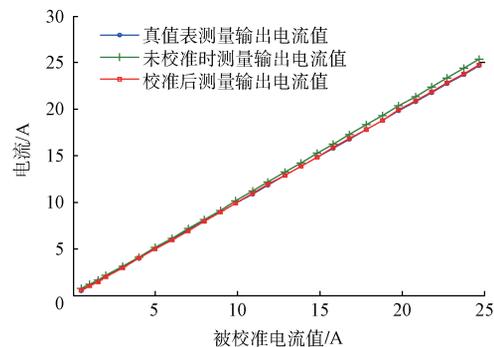
图 11 输出电压的 u_{AC} 、 u'_{AC} 和 u''_{AC} 

图 12 校准前和校准后输出电压的相对误差

图 13 输出电流的 i_{AC} 、 i'_{AC} 和 i''_{AC}

5 结 论

本文设计了一套具有数据采集、处理、实时显示、保存和回放功能的太阳能并网光伏数据采集系统。对测量结果进行了分段最小二乘拟合法校准,有效减小了测量误差,保证了数据采集的正确性和稳定性,提高了整个系统的测量精度,这种方法可以广泛用于数据采集或测量系统,具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 聂如青,李英姿,贺琳. 基于单片机的太阳能数据采集及显示系统开发[J]. 北京建筑工程学院学报, 2010(01):45-48,62.
- [2] 王连玉,孙青林,马洪文,等. 太阳能发电系统数据采集与传输的硬件设计[J]. 现代电子技术, 2010(08):41-42,45.
- [3] 杨刚,陈鸣,姚少雄,等. 太阳能光伏发电系统数据采集和测试平台[J]. 微计算机信息, 2009(10):86-88.
- [4] 张旭,亓学广,李世光. 基于 STM32 电力数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2010(11):90-93.
- [5] 姚兰,刘鹏. 基于 LabVIEW 的太阳能数据采集软件系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012(03):103-105.
- [6] 蔡畅,戚文军,农登,等. 数据采集系统设计[J]. 现代电子技术, 2012(01):157-159.
- [7] 章上聪,许海波,吴桂初,等. 塑壳断路器分断角速度非接触式检测方法及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(07):995-1002.
- [8] 张淑梅. 基于 ARM+FPGA 的高精度数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014(11):62-65.
- [9] 刘经南,曾文宪,徐培亮. 整体最小二乘估计的研究进展[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2013(05):505-512.
- [10] 杨扩军,田书林,蒋俊,等. 基于 TIADC 的 20 GS/s 高速数据采集系统[J]. 仪器仪表学报, 2014(04):841-849.

(下转第 65 页)