# 电动机微机自动测试系统测试误差分析及改进方法

王 博,赵海森,李和明,罗应立,张 虹

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:从系统测量精度的角度出发,研究非标设备对电压、电流、电功率等电气量测试误差的影响。结果表明,测试系统有功功率测试误差为电压、电流、功率因数及采样环节测试误差之和,且标称相对误差会随被测 电气量的减小而增大。在此基础上,提出互感器在全量程范围内进行变比、相位修正措施,以及消除因频率波 动引起计量误差的解决方案。试验结果表明,电机负荷高于 20%时,有功功率测试误差可由 1.2%降低至 0.35%。

关键词: 电动机; 互感器; 自动测试; 测量误差; 误差分析; 功率测量; 数据采集

中图分类号: TM 351 文献标识码: A

DOI: 10.3969/i.issn.1006-6047.2014.06.012

## 0 引言

自"十一五"计划推行节能减排政策以来,我国 各行业短期内涌现出大量节能产品及节能控制装 置,电动机产业也不例外。企业在选购新电机时或旧 电机维修后再次投入使用前,有必要对电机进行准 确的性能参数测试。微机测试系统操作简便、自动 化程度高,可大幅缩短测试时间,提高工作效率,近 年来得到广泛的推广应用<sup>[11]</sup>。检测结果是评价产品 质量优劣的依据,而电动机微机自动测试系统又是 人为设计、搭建及编程实现的测试平台,系统的测试 误差受多方面影响<sup>[2]</sup>。以有功功率测量为例,文献 [3-4]讨论了仪用互感器出厂误差对测量结果的影

收稿日期:2013-08-16;修回日期:2014-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307050);中央高校 基本科研业务费专项资金资助项目(2014XS05)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307050) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014XS05) 响,并给出了相应的修正方法;文献[5-6]分析了电压 互感器(TV)二次引线压降引起电度计量误差的机 理,并给出了相应的补偿措施及引线布线规则;文献 [7-9]指出在电源波形畸变情况下应采用各次谐波功 率求和算法,常规算法会引起较大的计算误差;文献 [10]介绍了三相不对称负荷对功率测量误差的影响 及校正方案。在实际使用过程中,上述文献所述的各 误差因素及改进措施的使用场合均有一定的限制, 移植性不强;且采用上述措施后,通常只定性认为系 统精度会有所提高,但具体各环节测试误差与系统 整体误差之间的关系并无明确说明。所以,受到多个 因素影响的微机测试系统整体测试误差就是一个值 得分析、讨论的问题。

微机测试系统有其独特的结构特点:2级TV串联;电流互感器(TA)需经精密电阻完成电流信号向电压信号(*I/U*)的转换;信号经数据采集卡 A/D采样后送入微机处理。鉴于以上特点,本文从电压、电流

··+·+·+·+·+·+·+·+·+·+·+·+

Non-inductive arc-suppression and active grounding compensation system

based on master-slave inverters

CHEN Zhongren<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China)

Abstract: A non-inductive arc-suppression and active grounding compensation system based on master-slave inverters is designed to effectively compensate the active-power and harmonic components of grounding fault current, which is composed of a master inverter for compensating the fundamental and active components and a slave inverter for compensating the harmonic components. During normal operation, both constant frequency injection method and asymmetric voltage method are used to respectively measure the fundamental and active component of grounding fault current. When single-phase grounding fault occurs, the fault current at neutral point is detected and its harmonic component is extracted by FFT algorithm. The master and slave inverters are then quickly switched on to completely compensate the grounding fault current and keep the residual current at a lower level. The feasibility and effectiveness of the designed system are verified by computer simulations.

Key words: electric inverters; master-slave inverter; non-inductive arc-suppression; active grounding; compensation

的测试流程角度出发,着重分析了互感器及数据采 集卡等非标设备对系统功率测试误差的影响,并根 据误差理论凹推导出它们之间的关系表达式。考虑 到测试系统整体误差不仅受元器件精度的影响,还 与电能质量、不对称度以及功率算法等众多因素有 关,为便于分析,试验在实验室电源质量均达标的时 间段进行,以排除此类因素对测试误差的影响。在 此基础上,提出了互感器在全量程范围内的误差修 正方案以及消除由频率波动引起采样误差的方案: 并以一套微机测试系统为例进行现场实测,验证本 文提出的误差分析及改进方法的正确性、有效性。

#### 电动机微机自动测试系统结构介绍 1

电动机微机测试系统由供电线路、控制回路、仪 用互感器、数据采集卡、微机5个部分组成,系统结 构如图1所示。区别于电气仪表测试,微机测试系统 是课题组自行设计、搭建的硬件系统:软件算法也是 由开发人员编程实现的,元器件精度选型及微机数 据处理算法不尽相同,其特点在引言中已作总结,此 处不再赘述。





#### 测试误差分析 2

以一套电动机微机测试台为例,从电压、电流的 测试流程角度分析互感器及数据采集卡等非标设备 对系统整体测试误差的影响。

#### 2.1 仪用互感器准确度等级对功率测量的影响

2.1.1 2级TV 串联时的累积误差分析

微机自动化测试系统采集的信号幅值通常低于

10V.值得注意的是电压测 量时,为保证测量精度工业 上常采用2级TV串联的 接线方式,结构示意图如 图2所示。



互感器的准确度等级 S 是以最大绝对误差 Δ<sub>m</sub> 与仪器量程A\_m的百分比表示的<sup>[12]</sup>,即:

$$S = \frac{\Delta_{\rm m}}{A_{\rm m}} \times 100\% \tag{1}$$

而标称相对误差  $\gamma$  是以最大绝对误差  $\Delta_m$  与当前测 量值A的百分比表示的,即:

$$\gamma = \frac{\Delta_{\rm m}}{A} \times 100 \,\% \tag{2}$$

图 2 中初级和次级 TV 准确度等级分别为 Sm、  $S_{U2}$ ,变比分别为 $k_1,k_2$ ,量程分别为 $A_{m1},A_{m2}$ ,则此时  $U_1, U_2, U_3$ 的最大绝对误差 $\Delta_{m1}, \Delta_{m2}, \Delta_{m3}$ 之间的关系式 为.

$$\Delta_{\rm m3} = k_2 (\Delta_{\rm m2} + k_1 \Delta_{\rm m1}) = k_2 (A_{\rm m2} S_{U2} + k_1 A_{\rm m1} S_{U1})$$
(3)

结合式(1),将式(3)代入式(2)可推导出,2级 TV 串联时总的标称相对误差  $\gamma_U$  如式(4)所示。

$$\gamma_{U} = \frac{\Delta_{m3}}{A_{3}} = \frac{S_{U1} + S_{U2}}{\overline{A}_{3}}$$
(4)

其中,A3为被测量值;"-"表示取标幺值,后同。

由式(4)可知,2级TV串联时总的标称相对误 随着被测电压幅值的减少而增大。

2.1.2 TA 测量环节中 I/U 变换的误差分析

I/U 变换结构如图 3 所示.图中TA 二次侧 电流经精密电阻 R 产生 压降转换为电压信号,结 合式(1)、(2)可以推导 出 I/U 转换后测量信



图 3 TA 测量时的 I/U 变换环节 Fig.3 I-U conversion in current measuring with CT

号标称相对误差 γ, 的表达式为:

$$\gamma_I = \frac{\Delta_{\rm m}}{U} = \frac{I(R_{\rm m}S_R) + R_{\rm m}(I_{\rm m}S_I)}{IR} = \frac{S_R}{R} + \frac{S_I}{IR}$$
(5)

其中,I为被测电流; $S_{R}$ 、 $S_{I}$ 分别为精密电阻和被测电 流的准确度等级。通常,精密电阻精度很高,可达到 0.05%、0.01%,在测量过程中可认为电阻基本不变, 即 R≈R<sub>m</sub>,故式(5)可化简为:

$$\gamma_I = S_R + \frac{S_I}{\bar{I}} \tag{6}$$

通过式(6)可以看出,I/U变换环节电流测量标 称相对误差与被测电流标幺值有关,此外,整体误差 还附加一项精密电阻准确度等级 S<sub>R</sub>。

2.1.3 仪用互感器相位误差对测量精度的影响

相位误差是负载电流的函数[13],补偿难度较大, 这会影响功率测量精度,而仪用互感器在使用过程中 不可避免地存在相位偏差,基于相关误差理论推导出 由相角误差 Δφ 引起的功率测量误差如式(7)所示。

$$\gamma_{\varphi} = \frac{\delta_{\varphi}}{\cos\varphi} = -\Delta\varphi \tan\varphi \tag{7}$$

仪用互感器检定规程明确规定 0.2 级互感器角 差  $\Delta \varphi$  不得大于 0.17°, 实测显示, 当  $\varphi$ =85° 时由式(7) 计算可得仅相角误差一项因素引起的测量误差可达 3.39%。可见,当电动机运行在低功率因数的空载或 轻载情况时,由相位偏差引起的系统测试误差不容 忽视。

#### 2.2 A/D 转换过程中误差分析

采样计算式功率测量方法<sup>[14]</sup>是一种非常普遍的 功率测量方法,TV、TA输出电信号均经 A/D 采样设备 送入微机进行数据分析及后处理。A/D 采样是微机测 试系统所特有的环节,此环节包含采样误差及量化误 差两部分,现作如下分析。

#### 2.2.1 采样误差分析

数据采样是微机测试系统的重要组成部分,采 样过程中因信号源频率波动引起的测试误差是不容 忽视的,文献[15-16]给出信号源频率波动引起测量 误差的理论值,如式(8)所示。

$$e_{sv} = \frac{U_{p}I_{p}}{2n} \sum_{i=0}^{n-1} \cos\left(\frac{4\pi mi}{n} + 2\alpha + \varphi\right) = \frac{U_{p}I_{p}}{2n} \operatorname{Re}\left(\sum_{i=0}^{n-1} e^{j\left[(4\pi mi)/n + 2\alpha + \varphi\right]}\right)$$
(8)

其中, $U_{p}$ 、 $I_{p}$ 分别为被测电压、电流的峰值;n为采样 点数;m为n个采样点数所覆盖的信号周期个数; $\alpha$ 为信号的采样初相角; $\varphi$ 为功率因数角。

式(8)中,理想情况下 m 为整数,即在每个采样 周期(n 个采样点)内 m 均为恒整数,使用图形解 法<sup>16</sup>可知式(8)中的累加和为零,但事实上电网频率 波动是不可避免的,此时无法保证采样周期等于整数 个信号周期。这是由于在 m 个信号周期采样结束后 又多采样一小段数据点引起的。本文提出消除该误 差的技术方案将在第3节中详述。

2.2.2 量化误差分析

随着电子行业的飞速发展,现有 8 bit、12 bit、16 bit 甚至位数更高的 DSP 芯片,而量化过程是把模拟信 号按照信号幅值分为 2<sup>n-1</sup>份,表 1 给出不同位数芯片 对应的量化误差值。

表 1	不同位数芯片对应	的量化误差值
Tah 1	Quantization error	for different hits

DSP 芯片位数/bit	相对误差/%
8	0.7813
12	0.0488
16	0.003 1

一般 16 bit 即可满足精度要求较高的场合,此时量化误差为 0.0031%,可近似忽略不计。

由上述分析,可以得出以下结论:

a.2级TV 串联使用时电压测量的准确度等级 为各个TV 的准确度等级之和,在实际测量过程中, 标称误差会因被测电压标幺值的减小而放大;

**b.** TA 经 *I*/*U* 变换后,测试误差除附加了一项精密电阻误差 *S<sub>R</sub>* 外,在实际测量过程中,误差同样会因被测电流标幺值的减小而放大;

c. 固定采样模式下由电网频率波动引起的采样

误差是实时存在的,频率波动范围越大,误差也越大; d. 当 DSP 芯片位数较高时,量化误差可忽略不

计,一般 16 bit 即可满足系统测试要求。

### 3 微机测试系统功率测试误差的理论分析

综上所述,功率测量与互感器准确度等级、数据 采集设备及运算算法有关,通过对测试系统中互感器、 *I/U*变换及数据采集环节的误差分析,综合式(4)、式 (6)给出电压、电流标称相对误差表达式如下:

$$\begin{cases} \gamma_{U} = \frac{S_{U1} + S_{U2}}{\bar{U}} + 0.003\% \\ \gamma_{I} = S_{R} + \frac{S_{I}}{\bar{I}} + 0.003\% \end{cases}$$
(9)

已知 *P*=*UI*cos φ,可见有功功率测量误差与电 压、电流、功率因数 3 个参数的测试误差有关,由误 差理论推导可知,功率测试误差等于以上三者误差 之和.即:

$$\gamma_{P} = \gamma_{U} + \gamma_{I} + \gamma_{\varphi} = \frac{S_{U1} + S_{U2}}{\overline{U}} + S_{R} + \frac{S_{I}}{\overline{I}} - \Delta\varphi \tan\varphi + 0.006\% \qquad (10)$$

由式(10)可知,系统输入功率测量精度并非恒 定值,而是随互感器相位偏差及电机运行工况下电压、 电流标幺值变化而变化的。

### 4 减小测试误差的改进方法

经过上述理论分析,针对互感器及数据采集等非标设备,本文提出2种减小测试误差的改进方法,并以一套微机测试平台为例,进行现场测试,前后测试数据表明该方法是简便、有效的。

#### 4.1 提高测试精度的改进方法

首先,由于制造工艺及使用环境等原因,现场互 感器变比及相位均会偏离理论值,互感器变比、相位 误差是存在优化空间的。文献[17]提出的应用 T 型 等效电路来提高 TA 精度的补偿算法在实际的工程 应用中因阻抗参数未知而不易实现;而文献[18]附 录中变比、相位修正方法较易实现,但仅限于恒值修 正。本文使用标准电压源、电流源测量得到互感器的 实际变比及相位误差曲线,然后通过线性插值的方法 对互感器变比、相位在全量程范围内进行实时修正, 该方法无需已知互感器等效电路参数,较已有补偿算 法简便有效,通用性强。

其次,微机自动化测试系统因其快速、高效的数 据运算优势,可有效消除 A/D 采样过程中信号源频 率波动给功率测量结果带来的误差影响,技术解决方 案的原理框图如图 4 所示。采样数据经离散快速傅 里叶变换(DFFT)<sup>10</sup>处理,计算得到信号的实际频率 f',然后按式(11)截取所需采样数据个数 n'。



图 4 采样数据处理流程图 Fig.4 Flowchart of sample data processing

$$n' = \begin{vmatrix} \frac{n}{f'}f & f' \ge f\\ \frac{n}{f'}(f-1) & f' < f \end{vmatrix}$$
(11)

其中,f为电流理想频率 50 Hz。

### 4.2 测试结果及数据分析

文献[7]指出采样频率达到一定阈值时,采样误差将稳定在一定幅值。本测试台选用的采样频率10 kHz,即可满足测试要求,图 5 为采样周期为 0.3 s 和 0.5 s 时,采用第 4.1 节中的数据截取方案前后在某钢厂实测的功率计量误差曲线。由图 5 可见,当采样周期为 0.5 s 时,电网频率波动超过±0.05 Hz,该方案可将由采样引起的功率计量误差控制在 0.05%以内,能有效抑制电网频率波动对功率计量误差的影响。



with and without data interception

引言中提及,为避免试验时非正弦、三相不对称 时电能质量以及 TV 二次压降等引起的功率计量误差, 试验选在电源电能质量达标的时间段进行。同时, 为排除供电线路损耗对测量结果的影响,测点选在机 端,电机选用谐波含量较小的异步电机。选用 Fluck 公司生产的 Norma 5000 功率分析仪,功率测量精度 可达 0.05 级,以此作为真值参考,该测试平台所选 用互感器、精密电阻、数据采集卡的参数见表 2。

表 2 微机测试台非标设备精度 Tab.2 Accuracy of non-standard equipments of microcomputer-based automatic test system

mieroeompater based automate test system				
设备	参数	量程	准确度等级	
初级 TV	750 V/100 V	$0\sim750~{\rm V}$	0.2%	
次级 TV	100 V/3.53 V	$0 \sim 100 \ {\rm V}$	0.1 %	
TA	$150~\mathrm{A}/100~\mathrm{mA}$	$0 \sim 150~{\rm A}$	0.2%	
精密电阻	阻值 30 Ω	—	0.05%	
A/D 采样	16 bit(S 系列)	$0 \sim 5V$	0.0031 %	

注:TV、TA的参数为输入/输出信号幅值。

电机负载为 20% 时功率因数角  $\varphi$  = 71.3°, 测得 功率因数角偏差  $\Delta \varphi$  = 0.08°, 参照表 2 参数, 结合式 (10)计算可得  $\gamma_P$ =1.4225%。

图 6 为全量程范围内变比、相位修正前后系统

功率测量精度曲线。由图 6 可知,系统功率测量精度 改进前后效果显著,修正前负荷 20% 以上时该微机 测试系统的功率测量误差为 1.2%,采用本文提出的 改进方法后,负载在 10% 以上时功率测量精度可达 0.35%,在兼顾系统成本的基础上,可满足高精度场 合的测试要求。



图 6 变比、相位修正前后系统功率精度对比 Fig.6 Comparison of power measurement accuracy between with and without transformer ratio and phase correction

#### 5 结语

本文着重从互感器及数据采集设备角度,分析了 影响微机自动化测试系统功率测试误差的几个因素, 并给出了功率测量精度与各影响因素之间的数学关 系表达式;在此基础上提出互感器在全量程范围内的 变比、相位修正措施及频率波动引起的 A/D 采样误 差解决方案。最后,以一套微机测试系统为例进行 现场测试及改造,在电能质量、互感器二次引线及三 相电源不对称度均达标的情况下,采用本文提出的改 进方法及建议可使系统功率测量误差由 1.2%降 低至 0.35%,完全满足系统精度要求 0.5级的设计指 标,达到预期改进效果。本文方法为分析系统整体 测试误差提供了理论依据,可供其他研究单位及企业 借鉴,具有一定的现实意义和实用价值。

#### 参考文献:

- WANG Bo,ZHAO Haisen,LIAN Shoujun. Study on precision selection of instrument transformer and its calibration for automatic test system[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,333: 2461-2464.
- [2] 金惟伟,徐伟专,钱岑. 解读测试设备的精度指标[J]. 电机控制 与应用,2009,36(7):49-52.
   JIN Weiwei,XU Weizhuan,QIAN Cen. Analysis on accuracy

performance of motor test equipment [J]. Electric Machines & Control Application, 2009, 36(7):49-52.

- [3] BRANDOLINI A, FAIFER M, OTTOBONI R. A simple method for the calibration of traditional and electronic measurement current and voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5):1345-1353.
- [4] RIETVELD G, JOL L, van den BROM H E, et al. High-current CT calibration using a sampling current ratio bridge[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (6): 1693-1698.
- [5] 周建生,黄小悦. 降低电压互感器二次回路压降的技术措施[J]. 电测与仪表,2001,38(8):27-28.

1

ZHOU Jiansheng, HUANG Xiaoyue. Reduce the voltage drop in the voltage transformer secondary circuit, increase the veracity of electric energy measuring [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2001, 38(8):27-28.

- [6] 刘宗林. 电压互感器二次导线所引起电度计算附加误差的简捷 计算法[J]. 华北电力技术,1982(3):1-8.
- [7] 钱伟,程肇基. 非正弦波形有功功率的采样法测量[J]. 电工技术 学报,1996,11(2):47-50.

QIAN Wei, CHENG Zhaoji. The sampling active power measurement under non-sinusoidal waveform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(2):47-50.

- [8] KUSLJEVIC M D, TOMIC J J, MARCETIC D P. Active power measurement algorithm for power system signals under nonsinusoidal conditions and wide-range frequency deviations [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2009, 3(1):57-65.
- [9] 张利霞,张孟,张介秋. 有效值及有功功率测量的谱泄漏对消算 法[J]. 电工技术学报,2012,27(6):205-209.

ZHANG Lixia, ZHANG Meng, ZHANG Jieqiu. Spectral leakage cancellation algorithm in measurement of RMS value and active power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27 (6):205-209.

[10] 殷家敏. 三相不对称负荷功率测量误差校正方案[J]. 重庆电力 高等专科学校学报,2011,16(6):62-64.

YIN Jiamin. The error correction scheme of the measurement of the three-phase asymmetric load power[J]. Journal of Chongqing Electric Power College,2011,16(6):62-64.

- [11] 吴旗. 电气测量与仪器[M]. 北京:高等教育出版社,2004:63.
- [12] 才家刚. 电机试验手册[M]. 北京:中国电力出版社,1997:55.
- [13] 富致超,江大川.采样原理功率表中仪用互感器引起误差的软件 修正[J].电测与仪表,1999,36(8):40-42.

FU Zhichao, JIANG Dachuan. Error correction of power meter

basing the sampling principle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1999, 36(8):40-42.

- [14] CORNEY A C. Digital sampling laboratory wattmeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987, 36(1): 54-59.
- [15] 王学伟. 模拟、数字及混合采样功率测量的理论与误差研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2002.
   WANG Xuewei. Research on theory and error of analog digital and mixed sampling power measurement[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology,2002.
- [16] DIX C H. Calculated performance of a digital sampling wattmeter using systematic sampling[J]. IEE Proceedings of Science, 1982, 129(3):172-175.
- [17] KANG Y C,ZHENG T Y,KIM Y H,et al. Development of a compensation algorithm for a measurement current transformer
  [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5 (5): 531-539.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB1032-2012 三相异步电动机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [19] DONNELLY D, RUST B. The fast Fourier transform for experimentalists, part II :convolutions[J]. IEEE Computing in Science & Engineering, 2005, 7(4):92-95.

#### 作者简介:



王 博(1988-),男,河北安平人,博士 研究生,主要从事电机故障检测与电机控制 工作(**E-mail**:18611148096@126.com)。

# Analysis of measurement error for electric motor test system and countermeasures

WANG Bo, ZHAO Haisen, LI Heming, LUO Yingli, ZHANG Hong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract**: The influence of non-standard equipment on the measurement error of electrical variables such as voltage, current and power is studied from the aspect of system measurement accuracy, which shows that, the system measurement error of active power is the measurement error sum of voltage, current, power factor and sampling loop, and the nominal relative error increases along with the decrease of electrical variables. The measures to correct the transformer ratio and phase covering full measurement range and the solution to eliminate the measurement error caused by frequency deviation are proposed. Experimental results show the system measurement error of active power decreases from 1.2% to 0.35% when the load of electric motor is higher than 20%.

Key words: electric motors; electric transformers; automatic testing; measurement errors; error analysis; power measurement; data acquisition