

霍尔传感器的角差对功率测量的影响

李庆莲¹,雷民²,徐伟专³

(1. 湘电集团有限公司, 湘潭 411101; 2. 中国电力科学研究院, 武汉 430074; 3. 国防科学技术大学, 长沙 410073;)

摘要: 角差是互感器准确度指标的重要组成部分, 是影响功率测量准确度的主要因数之一。然而, 在变频电机、变频器、逆变器等的功率测量中, 由于目前广泛使用的霍尔电压、电流传感器一般不标称角差指标, 传感器的角差指标往往被忽视。通过对 LEM 公司的 LV100-4000 型霍尔电压传感器进行大量的试验和分析, 计算得到其相位误差值, 与由传感器标称上升时间推导得出的角差指标基本相符。在此基础上提出了霍尔电压传感器角差的估算公式, 并按照公式给出了常用霍尔电压传感器的角差参考值。

关键词: 霍尔电压传感器; 霍尔电流传感器; 角差; 相位误差; 功率因数

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号:

基金项目: 2012 年公益性行业科研专项经费项目 (201210037)

Influence of Holzer sensors' angle difference on power measurement

LI Qinglian¹, LeiMin², XU Weizhuan³

(1 Hunan Electric Group Co. Ltd, Xiangtan 411101; 2. China Electric Power Research Institute/ National Center for High Voltage Measurement, Wuhan 430074, China; 3 The national defense science and Technology University, Changsha 410073)

Abstract: Angle difference is an important part of transformer accuracy and one of the main factors influencing the power measurement accuracy. But in the power measurement of inverter motors, , inverters and voltage, current sensors, the angle error of sensor is often ignored because the nominal angle error of Holzer voltage and current sensors widely used are not given in general, . Through a large number of tests based on LEM 's LV100-4000 type of Holzer voltage sensor, the phase error is analyzed and calculated. The result is basically consistent with the angle difference derived from the nominal rise time of sensors. On the base of this the formula of Holzer voltage sensor angle difference is presented and according to which angle difference reference values of Holzer voltage sensors commonly used are presented.

Keywords: Holzer voltage sensor, Holzer current sensor, angle difference, phase error, power factor

0. 引言

霍尔电压、电流传感器具有无铁磁谐振、不易磁饱和、宽频带等特点, 广泛应用于交直流电参量测量^[1,2]。笔者在对采用 LEM 公司的 LV100-4000 型霍尔电压传感器及日本横河 WT3000 高精度功率分析仪构建的交流功率测试系统进行校准时发现其功率测量误差远远大于预估误差, 然而, 单独对其电压测量准确度及功率分析仪的功率测量准确度进行试验时, 两者均满足标称准确度指标。许多使用者也都遇到了同样的问题, 但往往简单归结为传感器与仪表不匹配, 而并未进行深入研究。本文对其误差原因进行了理论分析, 并重新构建了比对测试系统, 对分析结果进行了验证。

1. 霍尔电压传感器测量原理

霍尔电压传感器本质上是一种特殊的霍尔电流传感器, 其工作原理如图 1。

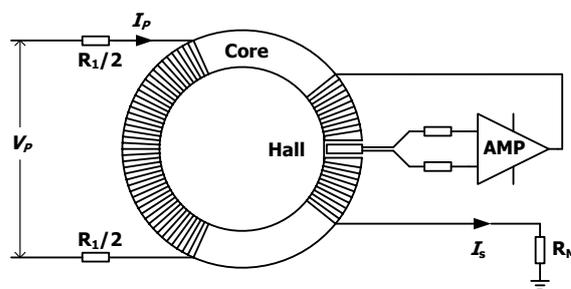


图 1 霍尔电压传感器工作原理图
Fig.1 Holzer voltage sensor working principle diagram

霍尔电压传感器由两个阻值为 $R_1/2$ 的限流电阻及基于磁平衡原理的闭环式霍尔电流传感器组成。被测电压也就是初级电压 V_p 经限流电阻变换为 mA 级的电流信号 I_p ， I_p 经过初级绕组在磁芯 (Core) 中产生磁通，并感应到霍尔器件 (Hall) 上，所产生的信号输出经放大器 (AMP) 放大并变换为次级补偿电流 I_s 。 I_s 通过次级绕组也在磁芯中产生与原磁场方向相反的磁场，抵消磁芯中的磁场，形成负反馈闭环控制系统，最终使磁芯中霍尔元件处的磁通趋于零，达到磁平衡。当初级电压 V_p 变化时， I_p 跟随变化，平衡受到破坏，将重复上述过程重新达到平衡。从宏观上看，次级绕组的补偿电流安匝数在与初级电流的安匝数相等。记 K 为初级绕组与次级补偿绕组的匝数比，则：

$$I_s = KI_p \quad (1)$$

由于正常工作时，磁芯中的磁通为零，初级绕组的感抗大大减小，在通频带范围内，初级绕组主要体现为电阻特性，且电阻远远小于 R_1 ，因此， $V_p \approx R_1 I_p$ 。将式 (1) 代入，可得：

$$V_p \approx R_1 I_s / K \quad (2)$$

R_1 和 K 为常数，记 $K_N = R_1 / K$ ，有：

$$V_p = K_N I_s \quad (3)$$

尽管零磁通工作方式降低了初级绕组的等效感抗，但是，由于初级电流很小，初级绕组匝数较多，在被测电压频率较高时，初级绕组的感抗仍不可忽略，因此，相比于霍尔电流传感器，霍尔电压传感器的带宽通常较窄，一般在 15kHz 以内。

2. LV100-4000 电压传感器

LV100-4000 是 LEM 公司的霍尔电压传感器，其主要技术指标如下^[3]：

- 初级额定有效值电压 V_{PN} : 4000V
- 初级电压测量范围 V_{PM} : $\pm 6000V$
- 次级额定有效值电流 I_{SN} : 50mA
- 变比 K_N : 4000V: 50mA
- 推荐取样电阻 R_M : 210 Ω
- 满量程精度 X_G : $\pm 0.9\%$
- 非线性度 ϵ_L : $< 0.1\%$
- 上升时间: 200 μ S

3. 功率测量及误差分析

采用 AT103501-W 变频功率标准源校准 LEM 公司的霍尔电压传感器 LV100-4000、霍尔电流传感器 LF1005-S 及日本横河的 WT3000 高精度功率分析仪构成交流功率测试系统。试验接线如图 2。

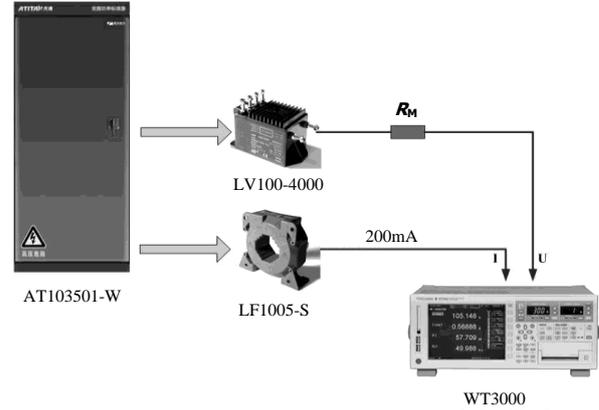


图 2 交流功率测试系统校准接线示意图

Fig.2 Schematic diagram of AC power measurement system calibration wiring

LV100-4000 额定输出电流为 50mA，经过 210 Ω 精密无感电阻变换为 10.5V 电压信号连接 WT3000 的电压输入通道，电压量程选 15V。精密电阻 R_M 的精度为 0.05%，温漂为 15ppm。LF1005-S 输出 200mA 电流直接连接 WT3000 的电流输入通道，量程选 200mA。

AT103501-W 变频功率标准源是目前国家变频电量测量仪器计量站用于变频电量测量仪器、传感器及系统校准检定的主要装置，在 100V~10kV、2.5~500A、5~400Hz 范围内，其电压、电流准确度级别为 0.05 级，在功率因数为 0.2~1 范围内，其功率测量准确度级别为 0.1 级，在功率因数为 0.02~0.2 范围内，其功率测量准确度级别为 0.1 级。经国家变频电量测量仪器计量站校准校准结果与产品标称指标一致。

WT3000 高精度功率分析仪在 45~66Hz 时，电压标称精度为：0.04% (0.01%rd+0.03%fs)；200mA 量程电流标称精度为：0.08% (0.03%rd+0.05%fs)；上述条件下，功率因数为 1 时，功率标称精度为：0.1% (0.05%rd+0.05%fs)。试验前，WT3000 采用 AT103501-W 变频功率标准源进行校准时，在 50Hz 正弦波输出，功率因数为 0.2~1 的情况下，试验数据见表 1。

LF1005-S 霍尔电流传感器的额定一次电流为 1000A，额定二次电流为 200mA，误差限值为 $\pm 0.4\%$ ，带宽为 150kHz。由于标准源最大输出电流为 500A，将霍尔电流传感器穿心两次，其安匝数与 1000A 穿心一次等效。

按照图 1 的试验线路，标准源输出 50Hz 正弦波电压和电流，保持电压、电流为额定值，改变功率因数，电压、电流及功率的试验数据记录见表 2 和表 3。

表 1 WT3000 功率分析仪功率数据记录

Tab.1 WT3000 power analyzer power data record

标准示值			被检仪表		
U_0/V	I_0/A	$\cos\varphi$	P_0/kW	P/kW	$E_P/\%$

1000	30	1.000	30.000	29.987	-0.05
1000	30	0.501	15.014	15.008	-0.04
1000	30	0.201	6.017	6.012	-0.07

表 2 交流测试系统电压、电流数据记录
Tab.2 AC voltage, current data test system records

标准示值		被检系统			
U_0/V	I_0/A	U/V	$E_U/\%$	I/A	$E_I/\%$
4000	1000	4021	0.53	998.3	-0.17
2000	500	2011	0.55	498.9	-0.22
1000	250	1006	0.60	249.3	-0.28

表 3 交流测试系统功率数据记录
Tab.3 AC test power system data recording

标准示值		被检仪表			
U_0/V	I_0/A	$\cos\phi$	P_0/kW	P/kW	$E_P/\%$
4000	1000	1.000	4000.0	4012.6	0.31
4000	1000	0.500	2000.1	2063.1	3.15
4000	1000	0.200	800.12	864.63	8.06

注：表 1~表 3 中数据均按照电压、电流传感器的变比及取样电阻参数换算到一次电压、电流和功率，标准示值根据被检霍尔电流传感器穿心匝数作了换算。 U_0 、 I_0 、 P_0 、 $\cos\phi$ 分别为电压、电流、功率、功率因数的标准示值， U 、 I 、 P 分别为被检品的示值， E_P 、 E_U 、 E_I 分别为被测示值相对误差，以下同。

WT3000 的实测最大误差为 -0.07%，LV100-4000 的误差限值 $\pm 0.9\%$ ，取样电阻的误差限值为 $\pm 0.05\%$ ，LF1005-S 的误差限值为 $\pm 0.4\%$ ，按照常规思路，上述交流测试系统的功率测量应小于上述误差之和 $\pm 1.42\%$ 。从测量数据看，电压、电流的误差均小于传感器标称的误差限值，且功率因数为 1 时，功率测量误差远远小于估计误差限值。但功率因数为 0.5 以下时，功率测量误差均远远超过了估计误差限值。

正弦电路中，有功功率的计算公式如下：

$$P = UI \cos\phi$$

P ：有功功率。

U ：电压方均根值。

I ：电流方均根值。

ϕ ：电压和电流的相位差。

实际测量中， U 、 I 和 ϕ 都会有误差，假设它们的绝对误差分别为 ΔU 、 ΔI 和 $\Delta\phi$ （以弧度为单位）。

由此引起功率的绝对误差为 ΔP ，那么：

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial P}{\partial \phi} \Delta\phi$$

$$= I \cos\phi \Delta U + U \cos\phi \Delta I + UI \sin\phi \Delta\phi \quad (4)$$

因为 $P = UI \cos\phi$ ，式 (4) 整理得到：

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \tan\phi \Delta\phi \quad (5)$$

$\Delta P/P$ 、 $\Delta U/U$ 、 $\Delta I/I$ 分别为 P 、 U 、 I 的相对误差，分别用 E_P 、 E_U 、 E_I 替代， $\Delta\phi$ 为相位差 ϕ 的误差，用 E_ϕ 表示（以下简称角差），则：

$$E_P = E_U + E_I + \tan\phi E_\phi \quad (6)$$

上式中，右边第三项误差分量是相位差 ϕ 的正切值与角差的乘积，具体数值与相位角 ϕ 密切相关。

当 $\phi=0^\circ$ 或 180° 时， $\cos\phi=\pm 1$ ， $\tan\phi=0$ ，功率测量准确度几乎不受角差的影响。

当 $\phi=90^\circ$ 或 270° 时， $\cos\phi=0$ ， $\tan\phi=\pm\infty$ ，任何非无穷小的角差，都会导致无穷大的功率误差。换言之，功率因数为零时，功率无法准确测量。

实际应用中，一般不会遇到功率因数为零的情

况，因此，考察功率因数较小时的功率测量准确度更有现实意义。

显然，功率因数越低，相同的角差对功率测量准确度的影响越大^[4,5]。

表 4 列出了相位角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时， 10° （相当于 0.2 级测量用电压、电流互感器的角差限值^[6]）角差引起功率测量误差 ($E_{P\phi}$)。

表 4 角差对功率测量准确度的影响
Tab.4 Angle difference influence on power measurement accuracy

序号	$\phi/^\circ$	$\cos\phi$	$\tan\phi$	$E_{P\phi}/\%$
1	36.9	0.7997	0.7508	0.2
2	60	0.5000	1.7321	0.5
3	78.5	0.1994	4.9152	1.4
4	87.1	0.0506	19.740	5.7
5	88.9	0.0192	52.081	15

由表 4 可知，对于 0.2 级的测量用电压、电流互感器，当功率因数小于 0.5 时，角差引起的功率测量误差已经明显超过比差。

对比表 1-3，结合功率测量误差分析，初步判定误差来源为霍尔电压传感器或霍尔电流传感器的角差。考虑到 LF1005-S 霍尔电流传感器的精度相对较高，带宽较宽，为了进一步确定误差来源，去除 LF1005-S，试验线路图如下：

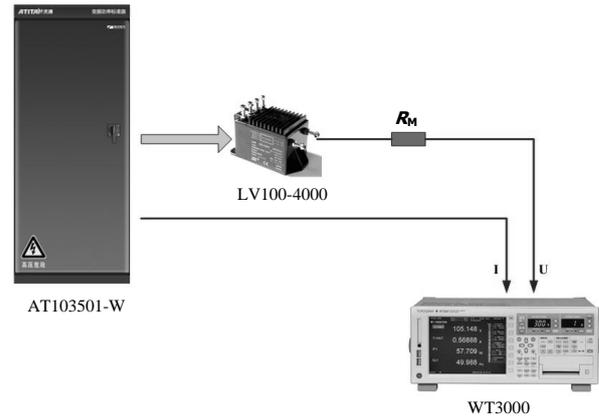


图 3 霍尔电压传感器角差测量接线示意图
Fig.3 Holzer voltage sensor angle difference measurement wiring diagram

考虑到传感器的角差与功率因数无关，而对于相同的角差，功率因数越低，对功率测量精度的影响越大，为了凸显角差的影响，本次试验在 50Hz、额定电压、额定电流、功率因数为 0.02~1 之间进行，试验数据如表 5：

表 5 交流测试系统功率测量误差记录
Tab.5 The test system of AC power measurement error record

序号	$\cos\phi$	P_0/kW	P/kW	$E_P/\%$
1	0.9998	119.98	120.58	0.5
2	0.5002	60.024	61.711	2.8
3	0.2001	24.012	25.885	7.8
4	0.1000	12.001	13.848	15.4
5	0.0502	6.0023	7.928	31.6
6	0.0200	2.4002	4.322	80.1

4. 霍尔电压传感器的角差分析

根据式(6),若已知电压、电流和功率的相对误差以及相应的标准相位值,即可计算出交流测试系统的整体角差(包括WT3000、LV100-4000、 R_M 及传输线路等引起的角差)。在功率因数小于等于0.2时,角差引起的功率测量误差占主导因数,又因WT3000的角差较小,整体角差近似等于LV100-4000霍尔电压传感器的在试验频率下的角差,记为 E_φ ,则:

$$E_\varphi = \frac{E_P - E_U - E_I}{\tan \varphi} \quad (9)$$

在50Hz下的角差进行计算,各个测量点由角差引起的误差分量 $E_{P\varphi}$ 及角差 E_φ 如表6:

表6 根据实际测量获得的角差估算值

Tab.6 According to the actual measured angle error estimates

$\cos\varphi$	P_0/kW	P/kW	$E_{P\varphi}/\%$	$E_\varphi/^\circ$
0.2001	24.012	25.885	7.8	0.91
0.1000	12.001	13.848	15.4	0.89
0.0502	6.0023	7.928	31.6	0.91
0.0200	2.4002	4.322	80.1	0.92

平均角差约为 0.91° ,约 $54'$ 。

LV100-4000的技术资料中,并未提供传感器的角差指标。但是,技术资料中提供了上升时间指标。上升时间属于时域指标,一般线性电路中,时域的上升时间与频域的带宽有着固定的联系,根据经验公式:

$$BW=0.35/t_r \quad (7)$$

BW: 带宽; t_r : 上升时间。

LV100-4000的上升时间为200 μ s,代入式(7)

可得,其带宽为1.75kHz。

用一阶RC低通滤波器近似表示传感器模型,带宽与角差的关系为:

$$E_\varphi = -\arctan \frac{f}{f_0} \quad (8)$$

f_0 为截止频率,可用带宽BW替代, f 为角差参考频率。

将 $f=50$ Hz和 $f_0=1750$ Hz代入式(8),得到:

$$E_\varphi = -1.6^\circ = -98'$$

该值与试验测量值基本一致,但仍存在一定偏差,其可能原因有:

1. 产品标称的上升时间一般是典型值或最大值,被检传感器的实际上升时间较短;
2. 传感器的数学模型与实际传感器特性存在一定差异。

然而,作为一般的检定判据原则,将 1.6° 作为该型号传感器角差的误差限值,被检样品的实际角差为 0.91° ,这是可以接受的。

5. 常见传感器的角差指标

目前1000V以下的变频功率测量通常采用仪表

直测,按照第4节的计算方式,对几种常见的额定电压1000V以上的霍尔电压传感器在50Hz时的角差进行计算。

表7列出了常见霍尔电压传感器,电压互感器及湖南银河电气有限公司的变频功率传感器SP103501C的角差及相关技术指标。

表7 常见电压传感器的角差及相关指标

Tab.7 The common voltage sensor angle difference and related indicators

序号	型号	V_{PN}/kV	BW/kHz	比差/%	角差/'
1	LV200-AW/2/1600	1.6	2.9	1	59
2	LV100-3000	3	1.94	0.9	89
3	LV200-AW/2/3200	3.2	1.75	1	98
4	LV100-4000	4	1.75	0.9	98
5	LV200-AW/2/6400	6.4	0.7	1	245
6	0.2级电压互感器	/	/	0.2	10
7	0.5级电压互感器	/	/	0.5	20
8	SP103501C	10	100	0.2	5

6. 结束语

目前工频电能计量采用的传感器主要是电磁式电压、电流互感器,两者均有明确的角差指标,功率测量误差可控制在明确的范围之内。非正弦或非工频电功率测量及电能计量中,霍尔电压、电流传感器使用较为广泛,用户在选用霍尔电压、电流传感器时,应尽可能要求厂家提供角差校准证书或将传感器送至权威计量检定部门进行角差溯源。

参考文献

- [1] 刘兆琦. 多功能霍尔传感器及其数学模型[J]. 仪器仪表学报 1987, 8(3):233-239.
- [2] 王瑞峰, 米根锁. 霍尔传感器在直流电流检测中的应用[J]. 仪器仪表学报 2006, 27(6)增刊:233-239.
- Wang Ruifeng, Mi Gensuo. Application of hall sensors in direct current detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6)supp:312-314.
- [3] LEM公司, LV100-4000霍尔电压传感器技术资料. LEM, Voltage Transducer LV100-4000 datasheet.
- [4] 张先庭, 陈琼, 邓洪峰. 交流功率测量相位偏移补偿的研究[J]. 电测与仪表 2013, 50(1):42-46.
- ZHANG Xian-ting, CHEN Qiong, DENG Hong-feng. Study of the Phase Deviation Compensation on AC Power Measurement[J]. 2013, 50(1):42-46.
- [5] 李晓林, 张春, 陈胜. 功率测量中互感器角差引起的误差及修正[J]. 2004, 41(9):4-7.
- Li Xiaolin, Zhang Chun, Chen Sheng. Power Error Analysis and Correction in Electric Measurement[J]. 2004, 41(9):4-7.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局, JJG 314-2010 测量用电压互感器检定规程, 2010.
- AQSIQ, JJG314-2010 Instrument Voltage Transformers, 2010.

作者简介

李庆莲(1959-),女,湘潭电机股份有限公司高级工程师。1982年毕业于湖南大学电磁测量技术及仪表专业,一直从事企业计量检测技术及计量管理工作。电话:0731-58626669; E-mail:xtlq1117@sina.com。

雷民:1963-,男(汉),博士,教授级高工,主要从事高电压计量与测试技术研究。电话:027-59834600; E-mail:leimin@epri.sgcc.com.cn。

徐伟专(1974-),男,高级工程师,从事电测与仪表技术研究。电话:0731-88392988; E-mail: AnyWay_cn@126.com。