

# 电能质量监测终端谐波电压的测量不确定度评定

胡海梅,熊健豪,兰鑫,杨柳

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

**摘要:**根据JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和Q/GDW 10650.4—2021《电能质量监测技术规范 第4部分:电能质量监测终端检验》的要求,分析在各种影响条件下,电能质量监测终端在谐波电压测量中所引入的A类及B类测量不确定度分量,并对其测量结果不确定度进行评定。

**关键词:**谐波电压;测量不确定度;电能质量

**中图分类号:**TM 933 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2024)06-0028-03

## 0 引言

电能质量监测装置是一种通过对引入的电压、电流信号进行分析处理,实现电能质量指标监测的专用设备,包括电能质量监测终端和便携式电能质量分析仪两类。电能质量监测终端适用于对其相关指标如电压、电流、频率、谐波电压、谐波电流等参数,进行长期在线监测的设备。

为满足接入江西电网谐波在线监测系统的要求,国网江西省电力有限公司电力科学研究院依据文献[1]、文献[2]等技术文件,对电能质量监测终端进行测试,保证其电压、电流、频率、谐波电压、谐波电流和电压暂升、暂降及短时中断等试验项目能在受控状态下运行,保障电力设备和电网的安全稳定运行。

根据功能、精度及测量方法,电能质量监测终端分为A级和S级,A级用于需用进行精确测量的场合。文中以A级电能质量监测终端为例,对其谐波电压值进行测量,按照文献[3]的要求,分析在各种影响条件下,在测量中所引入的A类及B类测量不确定度分量,阐述其测量结果不确定度的评定过程。

## 1 数学模型

该次测量使用的标准设备为电能功率标准源,被测量对象为电能质量监测终端,试验环境温度(23±

3) °C,相对湿度(30%~60%)。试验采用标准源法,即采用电能功率标准源作为信号发生器,直接输出标准信号对电能质量监测终端进行检验,谐波电压测量结果直接由仪器读数给出。

数学模型如式(1)所示:

$$HRU_h = HRU'_h \quad (1)$$

式中: $HRU_h$ 为第 $h$ 次谐波电压含有率,%; $HRU'_h$ 为第 $h$ 次谐波电压含有率仪器示值,%。

根据数学模型,灵敏度系数 $c$ 为:

$$c = \frac{\partial f}{\partial HRU'_h} = 1 \quad (2)$$

## 2 测量不确定度评定

文中选取A级电能质量监测终端为被检对象,设置系统基波电压100 V,频率50 Hz,谐波含有率为:2次谐波电压含有率5%,3次谐波电压含有率10%,5次谐波电压含有率0.3%,50次谐波电压含有率1%。分别对上述4个谐波电压测量点进行测量,并按照文献[3]的要求,对其测量结果不确定度进行分析。

### 2.1 不确定度来源

电能质量监测装置谐波电压的测量不确定度来源主要包括4个方面:

1) 测量重复性引入的标准不确定度,采用A类方法进行评定;

2) 电能功率标准源谐波电压允许误差引入的标

收稿日期:2024-09-18

作者简介:胡海梅(1984),女,大学本科,高级工程师,现从事电网测试工作。

准不确定度,采用B类方法进行评定;

3) 由误差修约引入的标准不确定度,采用B类方法进行评定;

4) 由被检表的分辨力引入的标准不确定度分量,采用B类方法进行评定。由于重复性中已经包含分辨力对检定或校准结果的影响,当重复性引入的不确定分量,大于被检表的分辨力所引入的不确定度分量时,将不再考虑分辨力所引入的不确定度分量;当重复性引入的不确定分量,小于被检表的分辨力所引入的不确定度分量时,应当用分辨力所引入的不确定度分量代替重复性引入的不确定分量,即两者取较大值。

## 2.2 标准不确定度的A类评定

测量重复性可通过连续测量,得到测量列,采用A类方法进行评定。在重复性条件下,连续独立测量10次,利用贝塞尔公式计算单次测量值的实验标准差值:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

由电能功率标准源的调节细度、环境的温度、湿度等因素的影响,导致的不确定度被认为都包括在此项标准不确定度中,故不再重复评定。

因为日常检定中,多采用单次测量数据为测量结果的方式,所以测量重复性引入的标准不确定度为:

$$u_A = s(x) \quad (3)$$

设置系统基波电压100V,频率50Hz,谐波含有率为:2次谐波电压含有率为5%,3次谐波电压含有率为10%,5次谐波电压含有率为0.3%,50次谐波电压含有率为1%,分别对这4个谐波电压值进行测量,其重复性测量数据及A类标准不确定度 $u_A$ 详见表1。

表1 标准不确定度的A类评定

谐波电压含有率/%	5	10	0.3	1
1	5.001	10.002	0.301	1.001
2	5.005	10.001	0.300	1.003
3	5.002	10.003	0.298	1.002
4	4.998	10.002	0.302	0.998
5	4.996	9.999	0.300	0.997
6	5.001	10.003	0.299	1.001
7	4.998	10.001	0.300	1.001
8	5.005	10.003	0.301	1.002
9	5.002	10.002	0.302	1.001
10	5.003	10.003	0.301	1.003
平均值 $\bar{x}$ /%	5.000	10.002	0.300	1.001
单次标准偏差 $s(x)$ /%	0.003 0	0.001 3	0.001 3	0.002 0
A类标准不确定度 $u_A$ /%	0.003 0	0.001 3	0.001 3	0.002 0

均以第10次测量值作为测量结果为例,则测量结果分别为:

$$HRU_2=5.003\%, u_A(HRU_2)=0.0030\%$$

$$HRU_3=10.003\%, u_A(HRU_3)=0.0013\%$$

$$HRU_5=0.301\%, u_A(HRU_5)=0.0013\%$$

$$HRU_{50}=1.003\%, u_A(HRU_{50})=0.0020\%$$

自由度 $\nu=10-1=9$ 。

## 2.3 标准不确定度的B类评定

1) 电能功率标准源谐波电压允许误差引入的标准不确定度 $u_{B1}$

从电能功率标准源的用户手册得知,电能功率标准源谐波电压幅值最大允许误差技术指标,为1年准确度指标加“开环24小时”稳定度指标,其技术指标如表2所示。

表2 谐波电压幅值技术指标

量程/V	输出/V	频率/Hz	年准确度 $\pm$ (ppm输出+mV)	开环24小时稳定度 $\pm$ (ppm输出+mV)
13~180	0~54	16~850	60	4.4
				75
				1.5

在基波电压100V,频率50Hz,输出0V~54V时,区间半宽为(60ppm $\times$ 输出+4.4mV+75ppm $\times$ 输出+1.5mV),在区间内被认为属均匀分布。查文献[3]可知,包含因子 $k=\sqrt{3}$ ,则由电能功率标准谐波电压允许误差引入的标准不确定度 $u_{B1}$ 分别为:

2次谐波电压含有率5%时:

$$u_{B1}(HRU_2) = \frac{60 \times 10^{-6} \times 5 + 4.4 \times 10^{-3} + 75 \times 10^{-6} \times 5 + 1.5 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 100} \times$$

$$100\% = 0.0038\%$$

3次谐波电压含有率10%时:

$$u_{B1}(HRU_3) = \frac{60 \times 10^{-6} \times 10 + 4.4 \times 10^{-3} + 75 \times 10^{-6} \times 10 + 1.5 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 100} \times$$

$$100\% = 0.0042\%$$

5次谐波电压含有率0.3%时:

$$u_{B1}(HRU_5) = \frac{60 \times 10^{-6} \times 0.3 + 4.4 \times 10^{-3} + 75 \times 10^{-6} \times 0.3 + 1.5 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 100} \times$$

$$100\% = 0.0034\%$$

50次谐波电压含有率1%时:

$$u_{B1}(HRU_{50}) = \frac{60 \times 10^{-6} \times 1 + 4.4 \times 10^{-3} + 75 \times 10^{-6} \times 1 + 1.5 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 100} \times$$

$$100\% = 0.0035\%$$

2) 由误差修约引入的标准不确定度 $u_{B2}$

依据文献[2]的要求,A级电能质量监测终端的谐波含有率 $U_h \geq 1\% U_N$ 时,最大误差为 $\pm 5\% U_h$ ;当其谐波含有率 $U_h < 1\% U_N$ 时,最大误差为 $\pm 0.05\% U_N$ ,误差修约间隔为最大允许误差的1/10,由误差修约引起的标准不确定度的区间半宽为修约间隔的一半。各个测量点的修约间隔和区间半宽如表3所示。

表3 各个测量点的误差修约间隔

谐波电压含有率/%	最大允许误差/V	修约间隔/V	区间半宽/V
5	±0.25	0.02	0.01
10	±0.5	0.05	0.025
0.3	±0.05	0.005	0.002 5
1	±0.05	0.005	0.002 5

A级电能质量监测终端谐波电压含有率分别为5%、10%、0.3%、1%时,由误差修约引起的区间半宽分别为0.01 V、0.025 V、0.002 5 V、0.002 5 V。在区间内服从均匀分布,包含因子 $k=\sqrt{3}$ ,则由误差修约引入的标准不确定度 $u_{B2}$ 分别为:

$$u_{B2}(HRU_2) = \frac{0.01 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 100 \text{ V}} \times 100\% = 0.005 8\%$$

$$u_{B2}(HRU_3) = \frac{0.025 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 100 \text{ V}} \times 100\% = 0.001 4\%$$

$$u_{B2}(HRU_5) = \frac{0.002 51 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 100 \text{ V}} \times 100\% = 0.001 4\%$$

$$u_{B2}(HRU_{50}) = \frac{0.002 51 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 100 \text{ V}} \times 100\% = 0.001 4\%$$

3) 被检表的分辨力引入的标准不确定度分量 $u_{B3}$

被检表A级电能质量监测终端的分辨力为0.001 V,则区间半宽为0.000 5 V,在区间内服从均匀分布,包含因子 $k=\sqrt{3}$ ,则各个测量点由分辨力引入的标准不确定度分量 $u_{B3}$ 为:

$$u_{B3}(HRU_h) = \frac{0.000 51 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 100 \text{ V}} \times 100\% = 0.000 3\%$$

## 2.4 合成标准不确定度评定

由于被检A级电能质量监测终端的重复性和分辨力存在重复,在合成标准不确定时,需将二者中较小者舍去,且这两个不确定度分量与其它不确定度分量间彼此独立,互不相关,故采用方和根方法合成。根据数学模型,灵敏度系数为1,则合成标准不确定度 $u_c$ 为:

$$u_c(HRU_h) = \sqrt{[\max(u_A, u_{B3})]^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (4)$$

### 2.4.1 合成标准不确定度 $u_c(HRU_2)$

基波电压100 V,频率50 Hz,谐波电压测量点为2次谐波电压含有率5%时,各标准不确定度分量如表4所示。

表4 2次谐波电压含有率5%时标准不确定度分量一览表

分量	不确定度来源	类型	标准不确定度/%
$u_A$	测量重复性	A	0.003 0
$u_{B1}$	标准源谐波电压允许误差	B	0.003 8
$u_{B2}$	误差修约	B	0.005 8
$u_{B3}$	被检表分辨力	B	0.000 3

合成标准不确定度:

$$u_c(HRU_2) = \sqrt{[\max(u_A, u_{B3})]^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} =$$

$$\sqrt{0.003 0^2 + 0.003 8^2 + 0.005 8^2} \% = 0.007 6\%$$

### 2.4.2 合成标准不确定度 $u_c(HRU_3)$

基波电压100 V,频率50 Hz,谐波电压测量点为3次,谐波电压含有率10%时,各标准不确定度分量如表5所示。

表5 3次谐波电压含有率10%时标准不确定度分量一览表

分量	不确定度来源	类型	标准不确定度/%
$u_A$	测量重复性	A	0.001 3
$u_{B1}$	标准源谐波电压允许误差	B	0.004 2
$u_{B2}$	误差修约	B	0.014 4
$u_{B3}$	被检表分辨力	B	0.000 3

合成标准不确定度:

$$u_c(HRU_3) = \sqrt{[\max(u_A, u_{B3})]^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} =$$

$$\sqrt{0.001 3^2 + 0.004 2^2 + 0.014 4^2} \% = 0.015\%$$

### 2.4.3 合成标准不确定度 $u_c(HRU_5)$

基波电压100 V,频率50 Hz,谐波电压测量点为5次,谐波电压含有率0.3%时,各标准不确定度分量如表6所示。

表6 5次谐波电压含有率0.3%时标准不确定度分量一览表

分量	不确定度来源	类型	标准不确定度/%
$u_A$	测量重复性	A	0.001 3
$u_{B1}$	标准源谐波电压允许误差	B	0.003 4
$u_{B2}$	误差修约	B	0.001 4
$u_{B3}$	被检表分辨力	B	0.000 3

合成标准不确定度:

$$u_c(HRU_5) = \sqrt{[\max(u_A, u_{B3})]^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} =$$

$$\sqrt{0.001 3^2 + 0.003 4^2 + 0.001 4^2} \% = 0.003 9\%$$

### 2.4.4 合成标准不确定度 $u_c(HRU_{50})$

基波电压100 V,频率50 Hz,谐波电压测量点为50次,谐波电压含有率1%时,各标准不确定度分量如表7所示。

表7 50次谐波电压含有率1%时标准不确定度分量一览表

分量	不确定度来源	类型	标准不确定度/%
$u_A$	测量重复性	A	0.002 0
$u_{B1}$	标准源谐波电压允许误差	B	0.003 5
$u_{B2}$	误差修约	B	0.001 4
$u_{B3}$	被检表分辨力	B	0.000 3

合成标准不确定度:

$$u_c(HRU_{50}) = \sqrt{[\max(u_A, u_{B3})]^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} =$$

$$\sqrt{0.002 0^2 + 0.003 5^2 + 0.001 4^2} \% = 0.004 3\%$$

## 2.5 扩展不确定度评定

取 $k=2$ ,计算扩展不确定度:

$$U_1 = k u_c(HRU_2) = 2 \times 0.007 6\% = 0.015\%$$

$$U_2 = k u_c(HRU_3) = 2 \times 0.001 5\% = 0.030\%$$

$$U_3 = k u_c(HRU_5) = 2 \times 0.003 9\% = 0.007 8\%$$

$$U_4 = k u_c(HRU_{50}) = 2 \times 0.004 3\% = 0.008 6\%$$

(下转第35页)

的光谱幅值不同,且物质浓度与光谱幅值之间呈线性正比关系。应用皮尔逊相关系数可实现对物质成分的识别,利用最小二乘法拟合的曲线可实现物质浓度的估计,从而实现对绝缘子表面污秽物的检测。

### 参考文献:

- [1] 李光耀.基于高光谱技术的绝缘子污秽状态图谱分析及其识别[D].成都:西南交通大学,2018.
- [2] Xia C, Ren M, Liu R, et al. Tracking moisture contents in the pollution layer on a composite insulator surface using hyperspectral imaging technology[J]. Analyst, 2024, 149 (10): 2996-3007.
- [3] 肖建华.基于可见光图像识别的绝缘子污秽等级判别方法研究[D].南昌:华东交通大学,2019.
- [4] 张血琴,周志鹏,李谦慧,等.基于高光谱技术的陶瓷绝缘子污秽等级检测[J].电力工程技术,2022,41(4):150-155.
- [5] 邱彦.输电线路绝缘子污秽程度及分布的高光谱检测方法研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [6] 石超群.基于高光谱技术的外绝缘污秽检测新方法研究

[D].成都:西南交通大学,2021.

- [7] Fan Y, Guo Y, Liu Y, et al. Study on the aging status of insulators based on hyperspectral imaging technology. [J]. Optics express, 2024, 32(4): 5072-5087.
- [8] 和戴.基于高光谱图像的绝缘子污秽识别方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [9] 谭克竹.基于高光谱图像和机器视觉技术的大豆品质检测研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [10] 邱彦,张血琴,郭裕钧,等.基于高光谱技术的绝缘子污秽等级检测方法[J].高电压技术,2019,45(11):3587-3594.
- [11] 张浩然,周杰,柳邦,等.一种基于最小二乘法的工业相机系统标定方法[J].计算机与数字工程,2023,51(11):2518-2523.
- [12] 李鑫.污秽成分对绝缘子交流闪络特性的影响研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [13] Lin K, Guo Y, Liu Y, et al. Outdoor detection of the pollution degree of insulating materials based on hyperspectral model transfer[J]. Measurement, 2023(214): 112805.
- [14] Li L, Wang Y, Zhang Y, et al. Identification of Insulator Contamination Status Based on Multi-spectral Image Fusion and Radial Basis Function Neural Network[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2474(1): 012064.

(上接第30页)

### 3 结语

综上所述,按照文献[3]的方法,完成了对A级电能质量监测终端谐波电压的测量不确定度的评定;按照文献[2]的规定,A级电能质量监测终端谐波电压含有率分别为5%,10%,0.3%,1%的测量结果需分别修约至0.02%,0.05%,0.005%,0.005%;依据文献[6],按照“四舍六入五留双”数值修约规则及所评定的扩展不确定度数值与测量结果的末位数一致的要求,被检A级电能质量监测终端在基波电压100V,频率50Hz,谐波电压含有率分别为5%,10%,0.3%,1%,修约后的测量结果分别表示如下:

1) 在2次谐波电压含有率5%时,测量结果为:  
 $HRU_2=5.00\%$ ,  $U=0.02\%$ ,  $k=2$ ;

2) 在3次谐波电压含有率10%时,测量结果为:  
 $HRU_3=10.00\%$ ,  $U=0.03\%$ ,  $k=2$ ;

3) 在5次谐波电压含有率0.3%时,测量结果为:

$HRU_5=0.300\%$ ,  $U=0.008\%$ ,  $k=2$ ;

4) 在50次谐波电压含有率1%时,测量结果为:  
 $HRU_{50}=1.005\%$ ,  $U=0.009\%$ ,  $k=2$ 。

### 参考文献:

- [1] 国家电网有限公司.电能质量监测技术规范:第2部分 电能质量监测装置:Q/GDW 10650.2—2021[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [2] 国家电网有限公司.电能质量监测技术规范:第4部分 电能质量监测终端检验:Q/GDW 10650.4—2021[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.测量不确定度评定与表示:JJF1059.1—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [4] 施昌彦.电力领域测量不确定度评定实例[M].北京:中国计量出版社,2010.6.
- [5] 中国计量测试学会.一级注册计量师基础知识及专业实务:第3版[M].北京:中国质检出版社,2013.
- [6] 国家标准化管理委员会.数值修约规则与极限数值的表示和判定:GB/T8170—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.