

基于闪变电压归算的间谐波源识别与物理实现

李永生, 张大海, 张晓东, 黄俊生, 赵振涛

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 在系统侧和用户侧同时存在同频次间谐波源时, 间谐波源识别中常用的有功功率法和阻抗法可能会给出错误的结论。提出了一种基于闪变电压归算的方法识别间谐波源, 该方法通过测量基波等效阻抗、频率修正、相量运算得到各支路等效间谐波源, 然后分别计算其作用于公共连接点的电压, 同时考虑了不同频率对闪变影响的差异性, 因此可以克服传统方法中同频次间谐波源相角差对测量结果的影响, 并量化系统侧和用户侧的责任。在理论分析基础上, 设计了一套数据采集装置并开发上位机软件实现所提算法。实验分析表明该装置工作可靠并验证了算法的有效性。

关键词: 间谐波; 电能质量; 闪变; 数据采集

中图分类号: TM 714; TM 935

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.025

0 引言

间谐波是指非整数倍基波频率的频谱成分^[1]。实际中, 常见间谐波源主要有变频器等非线性负荷。间谐波除了类似谐波的危害外, 还可能会引起次同步振荡、电压波动和闪变^[2-3]。为了有效地治理间谐波, 首先要解决间谐波源的识别问题。

过去对间谐波的研究主要局限于间谐波的相序特性^[4]、参数的测量与分析^[5-6]、闪变的传播^[7]等, 而对间谐波源识别的研究相对较少。间谐波源的识别需要经过间谐波源特征量的定义、特征量的检测和危害评估 3 个步骤。近年来, 已有学者采用有功功率法^[8-9]、阻抗法^[10]、闪变功率法^[11]进行间谐波源的识别。然而在系统侧和用户侧同时存在某一频次的间谐波时, 有功功率法和阻抗法都可能会给出错误的判断^[12]。因此, 本文提出了一种基于闪变电压归算的间谐波源识别方法, 该方法可以克服传统方法的不足并量化系统侧和用户侧的责任。

本文在理论分析及仿真验证的基础上, 开发了一套以 80C196^[13]为控制器的数据采集装置和上位机程序。该装置有 4 路模拟量输入并设有相应的电压形成电路; 为提高采样精度, 采用 12 位专用 A/D 转换芯片 AD574; 同时完成了存储器、键盘、液晶显示、串口通信等硬件电路及控制主程序的设计。上位机软件在 VC 环境中编写, 其与数据采集器通过串口实现通信; 数据采集器采集的电压和电流信号通过串口通信发送到上位机, 然后由上位机实现数据处

理并完成间谐波源识别及责任划分。

1 闪变电压法

间谐波源的识别系统见图 1, 其中 S、A 和 B 分别为系统侧、用户 1 侧和用户 2 侧的电气参数测量点。

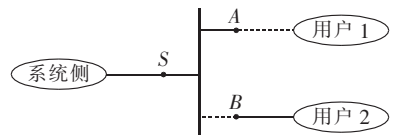


图 1 间谐波源识别系统

Fig.1 Inter-harmonic source identification system

在有功功率法中, 可以根据测量的间谐波功率流向及大小定性判断系统侧和用户侧哪侧是主间谐波源^[9], 然而仅根据功率的大小并不能直接判断其对公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)的影响水平。阻抗法^[10]同样只是定性给出主间谐波源, 并未提及责任的划分。

为此, 本文提出一种基于闪变电压归算的方法进行主间谐波源的识别, 并量化系统侧和用户侧的责任, 具体如下。

首先对 PCC 的电压和各条支路的电流信号进行傅里叶变换, 然后选取电压频谱较大的一个或几组间谐波。再根据计算的基波电压 U_1 、第 l 条支路基波电流 I_{ll} 计算该条支路等效的基波阻抗:

$$Z_{ll} = \frac{U_1}{I_{ll}} = R_{ll} + jX_{ll} \quad (1)$$

其中, R_{ll} 和 X_{ll} 分别为第 l 条支路的等效电阻和基波电抗。

间谐波频率分辨率由采样时间决定。类似谐波次数的定义, 对频率为 f_i 的间谐波定义其次数 i 为:

$$f_i = i\Delta f \quad (2)$$

其中, Δf 为频率分辨率; i 为间谐波次数。

在只考虑感性负载存在的前提下, 计算第 l 条支

收稿日期: 2012-03-09; 修回日期: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50707016); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50707016) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry

路在频率为 f_i 时的归算阻抗:

$$Z_{il}=R_{il}+jX_{il}(f_i/f_1) \quad (3)$$

根据其归算阻抗计算第 l 条支路的间谐波源等效电压:

$$E_{il}=U_i+Z_{il}I_{il} \quad (4)$$

其中, U_i 、 I_{il} 分别为 PCC 处频率为 f_i 的电压相量和流过第 l 条支路的电流相量。

系统侧阻抗的求解可根据短路容量求得其等效阻抗,然后进行频率修正:

$$Z_s(f_i)=R_s+j(f_i/f_1)X_s \quad (5)$$

其中, R_s 为系统侧等效电阻; X_s 为系统侧等效基波电抗。

对于可能含有无功补偿设备的 PCC,将其等效为容抗 X_c 。设无功补偿大小为 Q_c ,根据基波电压有效值 U_1 ,可求出其等效容抗为:

$$X_c=U_1^2/Q_c \quad (6)$$

然后进行频率修正:

$$X_c(f_i)=\frac{f_1 X_c}{f_i} \quad (7)$$

最后根据线路的连接关系,可得第 l 条支路的间谐波源单独作用时在 PCC 处产生的间谐波电压为:

$$U_{il}=\frac{Z_p}{Z_{il}+Z_p}E_{il} \quad (8)$$

其中, Z_p 为频率为 f_i 时其他支路的并联电抗。

同理,计算其他支路和系统侧在 PCC 的间谐波电压贡献值。参照国家标准^[14],可求得 PCC 上多个间谐波源同次间谐波合成电压为:

$$U_{\text{HT}}=\sqrt{U_{i1}^2+U_{i2}^2+\cdots+U_{in}^2} \quad (9)$$

其中, U_{i1} 、 U_{i2} 、 $\cdots$ 、 U_{in} 分别为第 1、2、 $\cdots$ 、 n 条支路中频率为 f_i 的间谐波源单独作用时产生的间谐波电压; U_{HT} 为 n 条支路中频率为 f_i 的间谐波产生的间谐波合成电压。

对于同频间谐波源,其对电压波动和闪变的影响水平主要取决于各个间谐波源分别作用于 PCC 处产生的电压降的幅值,幅值越大,说明其对电压波动的影响水平越大,造成的闪变效应越强。根据国家标准^[14]中关于 PCC 处同频间谐波合成电压的定义,本文定义各个间谐波源对 PCC 的同一频次电压贡献率 VCRRS(Voltage Contribution Rate of the Same frequency)如式(10)所示,以量化各间谐波源的责任。

$$\text{VCRRS}_{il}=\left(\frac{U_{il}}{U_{\text{HT}}}\right)^2 \times 100\% \quad (10)$$

其中, VCRRS_{il} 为第 l 条支路频率为 f_i 的间谐波源对 PCC 处的同频间谐波电压贡献率。

对于不同频次,应当根据其频段的含有率限制,添加相应的权重系数 c 。电压波动水平越小,说明该频次的间谐波电压波动很小时,就可能引起较强的

闪变, c 的大小是根据瞬时闪变视感度 $S=1$ 的情况下正弦波电压波动水平来设定的^[15]。因此,定义权重系数:

$$c_i=1/\Delta V_i \quad (11)$$

其中, ΔV_i 为第 i 次间谐波引起的瞬时闪变视感度 $S=1$ 时的电压波动百分比。

根据式(11)和文献^[15]中 ΔV_i 值,可以得到间谐波频率在 1.0~25.0 Hz 情况下的权重系数与频率的变化关系,部分结果见表 1。

表 1 电压波动、权重系数与频率的关系

Tab.1 Relationship among voltage fluctuations, weight factor and frequency

f/Hz	$\Delta V/\%$	c	f/Hz	$\Delta V/\%$	c
1.0	1.432	0.698	10.0	0.262	3.817
2.0	0.882	1.134	15.0	0.462	2.165
5.0	0.398	2.513	20.0	0.700	1.429
8.8	0.250	4.000	25.0	1.042	0.960

对于高次间谐波,由于其对电压有效值波动频率的影响主要与其相邻的谐波次数有关,因此可根据下式进行变换。

$$f_i=m f_1 \pm \Delta f \quad (12)$$

其中, m 为与该间谐波频率邻近的谐波次数。

闪变仪通过对测量信号进行加权滤波等得到不同电压波动水平下的闪变视感度。类似地,考虑各频次间谐波对 PCC 处电压闪变的影响水平的差异,根据式(11)定义的权重系数 c 可实现闪变仪中加权的目,即:

$$\text{VCRT}_l=\left(\sum_{i=1}^n c_i U_{il}^3 / \sum_{i=1}^n c_i U_{\text{HT}}^3\right) \times 100\% \quad (13)$$

其中, VCRT_l 为第 l 条支路对 PCC 处间谐波电压的总的贡献率。

2 系统设计

系统设计主要包括上位机软件设计及数据采集器软硬件设计,系统框图见图 2。上位机软件程序在 VC 环境中编写,数据采集器控制芯片采用 80C196 控制器,二者之间的联系通过串口通信来实现。

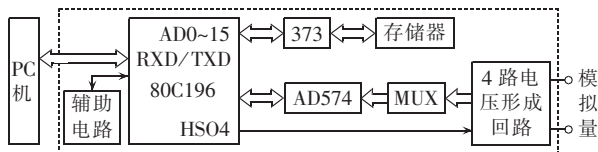


图 2 系统框图

Fig.2 Block diagram of system

2.1 上位机软件设计

本部分主要包括串口通信程序和数据处理算法软件的设计。VC 是一款微软推出的集成开发环境,其常用的串口通信控件是 Microsoft Communications Control Version 6.0。在 VC 环境中进行串口通信程

序编写步骤如下:设置与打开串口接口函数;获得串口设置和状态接口函数;设置串口发送数据方式、缓冲区接口及发送数据接口函数;设置串口接收数据方式、缓冲区接口及接收数据接口函数;设置与获取串口上发生的事件接口函数。同时,保证上位机软件中设置的参数同数据采集器中设置的串口参数一致。上位机软件将通过串行通信采集的数据进行标度变换,得到实际电气参数,再借助所提算法完成数据分析与处理。上位机主程序流程图见图 3。

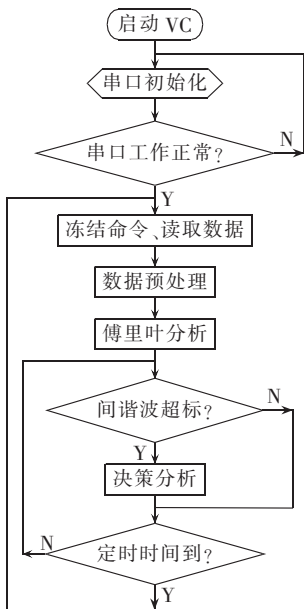


图 3 上位机主程序流程图
Fig.3 Flowchart of main program of superordinate computer

由于数据采集器不停地采集、存储和刷新数据,而上位机软件读取这些数据需要一定的时间,因此在数据采集器中设置了一条冻结命令。通过该命令可以控制数据采集器停止数据采集,并做好将数据发送到上位机的准备。上位机通过发送召唤数据指令至数据采集器即可实现对特定数据的读取。数据采集完成后,首先上位机对采集的数据进行预处理,将其折算为实际物理量,然后通过傅里叶分析得到基波和主要频次间谐波的电压、电流频谱;判断 PCC 间谐波电压是否超标,若超标则对系统侧和负载侧的等效阻抗进行频率修正,并计算系统侧和用户侧的等效电动势,然后分别计算系统侧或用户侧各频次间谐波源折算到 PCC 的电压,最后利用定义的权重系数分别计算系统侧和用户侧的间谐波贡献率情况,得到结论。另外,软件中利用 VC 提供的定时功能实现不同时间段电气信息的读取和分析。

2.2 采集电路软硬件设计

数据采集器硬件电路包括 CPU、电压形成电路、A/D 转换器、通信电路、辅助电路等。

数据采集器采用 INTEL 公司推出的一款 16 位处理器 80C196K。与 51 系列单片机相比,该处理器的时钟频率、存储器容量、中断数量、通信缓冲器等性能都明显提高,可以满足该数据采集器中的数据处理、通信等功能的要求^[13],且性价比高。

电压形成电路是指将被测的电气量转换为适合 A/D 转换器工作的电压信号,并实现外部电路与接口部件之间电气隔离的电路^[16]。将形成的 4 路电压信号分别经采样保持器 LF398 与多路选择开关 13508 相连,由微处理器的高速输出口 HSO4 发出保持信号后,处理器选择不同通道的输入模拟量信号依次进行 A/D 转换。为了提高采样数据的精度,A/D 转换器件采用 12 位专用芯片 AD574A。

80C196K 与上位机采用串口进行通信,其串行口有 4 种操作方式,即 1 种同步方式和 3 种异步方式。本系统采用串行异步通信方式,其串口参数设置流程见图 4。另外,对外围辅助电路进行了设计,包括电源电路、复位电路、晶振电路、指示灯、键盘和液晶显示等。

数据采集器的主程序流程见图 5。系统上电复

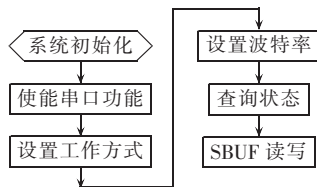


图 4 串口设置流程图
Fig.4 Flowchart of serial port settings

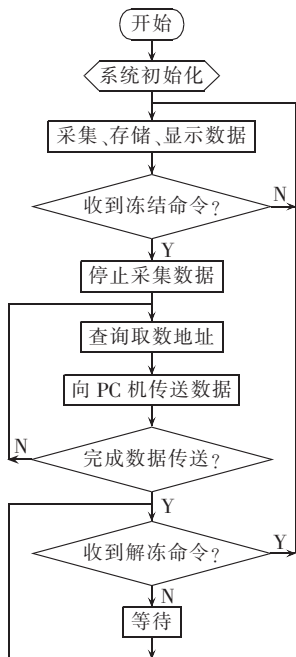


图 5 数据采集器主程序流程图
Fig.5 Flowchart of main program of data acquisition device

位后,数据采集器便开始采集数据,并进行初步处理后送液晶显示器显示;收到上位机软件的冻结和召唤数据等命令后,相应地冻结数据和向上位机发送采集的电压、电流数据。

3 实验分析

搭建如图 6 所示物理电路,基波电源电压为 $U_1=20\text{ V}$,6 路间谐波电压信号参数见表 2。阻抗参数为: $Z_s=0.5+\text{j}0.254\pi f\ \Omega$, $Z_1=100+\text{j}0.020\pi f\ \Omega$, $Z_2=100+\text{j}0.040\pi f\ \Omega$ 。

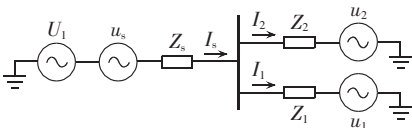


图 6 单相接线图
Fig.6 Single-phase wiring diagram

表 2 物理电路参数
Tab.2 Physical circuit parameters

f/Hz	u_s/V	u_1/V	u_2/V
10	0.1	5	2
25	0.1	2	5

为了验证所提方法的有效性及证明传统有功功率法和阻抗法的不足,首先分析有功功率法。系统侧和用户侧流过功率的计算结果见表 3。从表中可知,用户 1 和用户 2 侧的 10 Hz 和 25 Hz 间谐波功率均注入系统侧,因此,采用有功功率法,用户 1 和用户 2 侧为主间谐波源。然而,由物理实验电路可知,系统侧同样含有间谐波源,因此有功功率法在识别间谐波源时可能会得出错误的结论。

表 3 功率测量值
Tab.3 Measured power

f/Hz	功率/W		
	系统侧	用户 1	用户 2
10	-0.0088	-0.0065	-0.0023
25	-0.0092	-0.0022	-0.0070

其次进行阻抗法的分析。阻抗法是根据测量的间谐波阻抗与系统侧折算阻抗的差别进行间谐波源识别,其依据是系统阻抗远小于负荷阻抗。对于用户侧,其测量阻抗同系统侧折算阻抗相当时,则用户侧为主间谐波源;反之则系统侧为主间谐波源。阻抗测量结果见表 4,其中 $|Z_s(f_i)|$ 为系统侧阻抗换算值。可以看出,阻抗法难以识别出主间谐波源。因此,在

表 4 阻抗测量值
Tab.4 Measured impedances

f/Hz	阻抗/ Ω			
	系统侧	用户 1	用户 2	$ Z_s(f_i) $
10	2.1293	2.9367	7.6787	0.9417
25	2.8403	10.2979	3.9083	2.0566

系统侧和用户侧同时存在间谐波源时,阻抗法很可能得出错误的结论。

最后,根据本文所提间谐波源算法进行分析计算,计算结果见表 5,第 1、2 行数据分别为对应频率为 10 Hz 和 25 Hz 的情况。可以看出,系统侧对 10 Hz 分量的影响最大,接近 90%;对 25 Hz 分量,用户 2 侧的影响最大,系统侧次之。可见,该方法不仅能识别主间谐波源,而且可以给出系统侧和用户侧对 PCC 的影响水平。另外,考虑到各频率分量对 PCC 处闪变的影响水平的差异性,可以计算出系统侧、用户 1 侧和用户 2 侧对 PCC 的总贡献率。由于 10 Hz 分量对电压波动的影响远大于 25 Hz 分量,因此,系统侧的总间谐波电压贡献率远大于用户 1 侧和用户 2 侧的总间谐波电压贡献率。

表 5 VCRS 和 VCRT
Tab.5 VCRS and VCRT

指标	系统侧	用户 1	用户 2
VCRS/%	89.70	9.40	0.91
	44.79	2.97	52.24
VCRT/%	74.35	7.20	18.45

为验证本文方法及结论的正确性,下面将 6 路间谐波源依次单独作用,然后直接测量 PCC 处间谐波电压,结果见表 6。

表 6 间谐波电压测量值
Tab.6 Measured inter-harmonic voltage

f/Hz	U_{is}/V	U_{i1}/V	U_{i2}/V
10	0.097	0.046	0.021
25	0.098	0.040	0.103

表 6 中, U_{is} 、 U_{i1} 和 U_{i2} 分别为系统侧、用户 1 侧和用户 2 侧单独作用时 PCC 处测量到的间谐波电压。可见,对于 10 Hz 间谐波分量,系统侧间谐波源在 PCC 处引起的电压(0.097 V)远大于用户 1 和用户 2 引起的电压,因此系统侧对 PCC 的间谐波贡献率占主要部分,此结果与表 5 中 VCRS 的结果相一致;对于 25 Hz 间谐波分量,用户 2 侧和系统侧在 PCC 处产生的电压相近,且远大于用户 1 的在 PCC 处产生的电压,因此用户 2 侧和系统侧应负主要责任,这与表 5 中的结果一致。

4 结论

针对目前间谐波源识别中存在的问题,本文提出一种基于闪变电压归算的识别方法。该方法不仅可准确识别间谐波源,而且可以量化系统侧和用户侧的责任;同时开发了数据采集器及相应的算法程序。实验结果表明了本文算法的有效性及装置的实用性,具有良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] TESTA A, AKRAM M F, BURCH R, et al. Interharmonics: theory and modeling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(4): 2335-2348.
- [2] 林海雪. 电力系统的间谐波来源及其影响[J]. 电源技术及应用, 2010, 13(5): 1-6.
LIN Haixue. Origin of interharmonic and its effects on power system[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2010, 13(5): 1-6.
- [3] 邵振国, 吴丹岳, 薛禹胜. 闪变干扰源定位研究中的若干问题[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1595-1599.
SHAO Zhenguo, WU Danyue, XUE Yusheng. Some issues on the flicker sources location[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1595-1599.
- [4] 张大海, 徐文远. 间谐波相序特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 29-34.
ZHANG Dahai, XU Wenyuan. Study on the phase sequence characteristic of interharmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 29-34.
- [5] 金维刚, 刘会金, 李志敏, 等. 3种典型间谐波源的间谐波测量及结果分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 30-35.
JIN Weigang, LIU Huijin, LI Zhimin, et al. Interharmonic measurement of three typical interharmonic sources and result analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 30-35.
- [6] 惠锦, 杨洪耕. 一种新的电力系统谐波间谐波两步检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 28-34.
HUI Jin, YANG Honggeng. Harmonic and inter-harmonic detection method based on the neighboring spectral offsetting and windowed TDA in two stages[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 28-34.
- [7] 康健, 邵振国, 张培铭. 电动机动态向量法建模及对闪变传播的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 27-32.
KANG Jian, SHAO Zhenguo, ZHANG Peiming. Induction motor modeling with dynamic phasors and analysis of its influence on flicker propagation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 27-32.
- [8] XU Wilsun, LIU Yilu. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [9] ZHANG Dahai, XU Wilsun, NASSIF A. Flicker source identification by interharmonic power direction[C]//2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Saskatoon, Canada: [s.n.], 2005: 549-552.
- [10] NASSIF A B, JING Y, MAZIN H, et al. An impedance-based approach for identifying interharmonic sources[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 333-340.
- [11] 王建勋, 刘会金. 间谐波闪变效应计算及闪变源识别方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 52-58.
WANG Jianxun, LIU Huijin. A calculation method for interharmonics caused flicker and flicker source identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 52-58.
- [12] XU Wilsun, LIU Xian, LIU Yilu. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(1): 214-219.
- [13] 汪建, 孙开放, 章述汉. MCS-96系列单片机原理及应用技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 353-376.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T24337—2009 电能质量公用电网间谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 253-254.
- [16] 刘幼林, 姬劳. 基于DSP+CPLD的断路器智能控制单元设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 65-68.
LIU Youlin, JI Lao. Design of intelligent breaker controller based on DSP+CPLD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 65-68.

作者简介:

李永生(1985-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、电能质量与电力电子;

张大海(1973-), 男, 山东定陶人, 副教授, 博士, 通讯作者, 主要研究方向为电力系统监控、电力电子和小波理论应用(E-mail: dhzhang@sdu.edu.cn)。

Inter-harmonic source identification based on converted voltage flicker and its physical implementation

LI Yongsheng, ZHANG Dahai, ZHANG Xiaodong, HUANG Junsheng, ZHAO Zhentao

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: When both the supply side and user side have the inter-harmonic source of same frequency, the inter-harmonic source identification based on the active power flow method or impedance measurement method may give incorrect conclusion. An inter-harmonic source identification method based on the converted voltage flicker is proposed, which measures the fundamental impedance and carries out the frequency correction and phasor calculation to get the equivalent inter-harmonic sources of each branch. Because the voltages of common coupling point induced by the equivalent inter-harmonic sources are separately calculated with the consideration of flicker frequency difference, the influence of the phase angle difference among different inter-harmonic sources with same frequency on the measurement can be avoided and the responsibility of both system sides can be quantified. Based on the theoretical analysis, a data acquisition device is designed and the software algorithm of superordinate computer is developed. Experimental analysis shows the stability of the designed device and the effectiveness of the developed algorithm.

Key words: inter-harmonic; power quality; flicker; data acquisition