

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.022

# 基于 LabVIEW 的微网电能质量监测评估系统\*

沈 辉<sup>1</sup>, 谢志云<sup>2</sup>, 余子文<sup>1</sup>, 方晓辉<sup>2</sup>, 翁国庆<sup>2\*</sup>

(1. 浙江工业大学 健行学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**针对现阶段微网电能质量实时监测和综合评估系统软件缺失的问题,对微网电能质量合理的综合评估方法进行了研究,探讨了一种基于 LabVIEW 编程平台的电能质量监测评估系统的设计方案。首先,提出了一种基于改进的层次分析法(AHP)和灰色理论相结合的微网电能质量综合评估方法。然后,利用 LabVIEW 和 Matlab Script 语言混合编程优势,通过 LabVIEW 平台开发了一套可实现微网电能质量实时监测、合理评估和综合管理的智能系统,并利用学校的微网模型对该系统进行了测试。研究表明,该系统能实时监测微网各项电能质量指标,具有报警录波功能,同时可对微网的综合电能质量作出合理的评估,可生成报表以汇总微网各单项电能质量指标和综合电能质量评价结果,具有良好的工程化应用前景。

**关键词:**微网;电能质量;综合评估;LabVIEW

**中图分类号:**TM727

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2014)09-1201-05

## Power quality monitoring and evaluation system for micro-grid based on LabVIEW

SHEN Hui<sup>1</sup>, XIE Zhi-yun<sup>2</sup>, YU Zhi-wen<sup>1</sup>, FANG Xiao-hui<sup>2</sup>, WENG Guo-qing<sup>2\*</sup>

(1. Jianxing Honors College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Aiming at lack of the power quality real-time monitoring and the software of the comprehensive evaluation system for micro-grid, a reasonable method of power quality comprehensive evaluation was studied, a system for power quality monitoring and comprehensive evaluation based on LabVIEW was designed. Firstly, based on an analytic hierarchy process (AHP) method and grey theory, the power quality evaluation system was proposed. Then, based on LabVIEW, the system software for power quality monitoring, the comprehensive evaluation and intelligent management for micro-grid was developed by using hybrid programming method with LabVIEW and Matlab Script programming languages. It was simulated by the micro-grid model. The results indicate that the system software can be real-time monitoring of micro-grid, recorded wave function with alarm and make a reasonable assessment of the integrated micro-grid power quality, generate a summary report for the results. A good prospect for engineering application in micro-grid projects is shown.

**Key words:** micro-grid; power quality; comprehensive evaluation; LabVIEW

## 0 引 言

近年来,随着分布式发电技术日趋成熟,微网技术得到大力发展。有别于传统电网,微网中的各种微源

具有随机性强、波动大特点,而且包含大量电力电子装置,导致微网运行必然面临严峻的电能质量问题。一方面,电能质量问题将导致电气环境污染、威胁微网安全运行、降低系统能量效率、损坏用户设备等严重后果

收稿日期:2014-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207139);浙江省自然科学基金资助项目(LY12E07005)

作者简介:沈 辉(1992-),男,浙江余杭人,主要从事微网电能质量监测方面的研究. E-mail:465306634@qq.com

通信联系人:翁国庆,男,副教授,硕士生导师. E-mail:wgq@zjut.edu.cn

果;另一方面,在未来电力市场背景下,微网渗透率较高,电能质量的优劣将直接影响其按质定价及经济效益,同时决定能否被允许并网。所以能否对微网电能质量进行有效监测和评估,是进一步改善现状和解决问题的重要基础。

目前,国内外针对电网电能质量的监测装置主要有基于嵌入式微处理器平台和基于 PC 结合软件平台两类。其中,基于 PC 机并结合 LabVIEW 软件开发电能质量监测装置是后者的重要技术方向。电能质量监测装置带给微网的意义不仅仅在于可以为分布式能源的并网运行提供可靠的参考依据,也可使微网能够适应电力市场化进程以及客户对电能质量要求的不断提升。但是,一方面,大多数相关文献进行的研究主要是针对普通电网,而不是微网的电能质量问题<sup>[1-2]</sup>。另一方面,现有文献中尚未发现基于 LabVIEW 软件开发具有综合评估功能的电能质量监测装置的相关成果<sup>[3]</sup>。

针对微网电能质量监测评估,本研究首先提出一种基于改进的层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)和灰色理论相结合的微网电能质量综合评估方法。然后,基于 PC 机强大的人机交互和数据存储能力、LabVIEW 平台良好的软件开发能力以及 Matlab 软件优异的数值计算和算法编程能力,设计开发一套微网电能质量监测评估系统软件,其具有电能质量扰动信号实时监测、记录和录波回放功能及电能质量水平的单项指标和综合评估、越限报警、报表打印、专家建议等功能<sup>[4]</sup>。

## 1 微网电能质量综合评估

微网的电能质量评估与大电网相比并没有本质上的区别,但是微网规模较小,个体差异性较大,同时微网的线性负荷较之大电网明显偏多,加上系统具有动态随机性和分散性,导致电能质量的评估与大电网不同。鉴于微网电能质量对于微网运营的重要性,对微网电能质量建立一个客观、合理的评价体系具有重大意义。本研究考虑电压偏差、电压波动、电压闪变、三相不平衡、谐波畸变、频率偏差、电压暂降、电压暂升、短中断这 9 个电能质量单项指标,结合改进的 AHP 法和灰色理论建立其综合评估体系。

### 1.1 改进的 AHP 法

在传统的 AHP 法中,通常选用 1~9 标度法来生成判断矩阵,但是 1~9 标度法由于专家赋权的主观误差、权重标度不完备等原因往往无法保证判断矩阵一致性。本研究利用模糊数学理论的 0.1~0.9 标度法

对其进行改进,通过建立模糊一致性矩阵来求取权重向量。模糊一致性矩阵有更好的传递性和鲁棒性<sup>[5]</sup>,且在权重向量求取中无需再进行一致性检验。具体过程如下:

(1)利用 0.1~0.9 标度法对各个电能质量指标建立判断矩阵, $\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times n}$ ,0.1~0.9 标度法的赋值意义如表 1 所示。

表 1 0.1~0.9 各值的意义

比例标度	意义
0.1	元素 $i$ 绝对没有元素 $j$ 重要
0.3	元素 $i$ 明显没有元素 $j$ 重要
0.5	元素 $i$ 和 $j$ 具有同等的重要性
0.7	元素 $i$ 明显比元素 $j$ 重要
0.9	元素 $i$ 绝对比元素 $j$ 重要
0.2,0.4,0.6,0.8	上述相邻判断的中间值

(2)通过公式  $r_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$  和  $r_{ij} = (r_i - r_j)/(n-1) + 0.5$  将  $\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times n}$  转化成模糊一致判断矩阵  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

(3)通过模糊一致性判断矩阵求取权重向量,具体步骤如下:

①利用转换公式  $t_{ij} = r_{ij}/r_{ji}$  将模糊一致判断矩阵转化成正互反矩阵  $\mathbf{T} = (t_{ij})_{n \times n}$ ,利用几何平均法对正互反矩阵求取权重排序向量  $w^{(0)}$ 。

②然后将  $w^{(0)}$  作为迭代初始向量并取其无穷范  $\|V_0\|_{\infty} = \max\{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n}\}$ ,同时输入误差限制  $\varepsilon$  和最大迭代次数  $N$ 。

③利用迭代公式  $\bar{y}_k = V_k / \|V_k\|_{\infty}$  和  $V_{k+1} = T \bar{y}_k$  求取  $V_{k+1}$ 。

④如果  $|\|V_{k+1}\|_{\infty} - \|V_k\|_{\infty}| < \varepsilon$ ,则输出结果  $w = V_{k+1} = [v_{k+1,j} / \sum_{i=1}^n v_{k+1,i}]$ ,  $j \in [1, \dots, n]$ ;若不满足,使  $V_k = V_{k+1} / \|V_{k+1}\|_{\infty}$ ,继续返回步骤④继续迭代。

上述迭代过程不仅能得到符合精度要求的权重向量,也省去了判别一致性检验的麻烦,对传统的 AHP 法有了较好的改进。

### 1.2 灰色理论应用

灰色理论需要建立对象之间的关联系数和关联度<sup>[6]</sup>。对于  $m$  个样本  $S = \{s_0, s_1, \dots, s_m\}$ ,  $n$  个评价指标  $C = \{c_0, c_1, \dots, c_m\}$ ,建立初始样本指标矩阵  $\mathbf{D} = (d_{ij})_{n \times m}$ 。综合评价的步骤如下:

(1)通过式子  $x_{ij} = d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij}$  将样本数据去量纲后得到矩阵  $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

(2)计算关联系数:取  $\Delta_i(k) = |x_{ki} - x_{1i}|$ ,

$$a = \min_{1 \leq k \leq n} \min_{2 \leq i \leq m} \{ \Delta_i(k) \}, \rho = 0.5 \quad (1)$$

$$b = \max_{1 \leq k \leq n} \max_{2 \leq i \leq m} \{ \Delta_i(k) \} \quad (2)$$

其中:  $i=2,3,\dots,m, k=1,2,\dots,n$ 。利用公式  $y_{ik} = (a + bp) / (\Delta_i(k) + bp)$ , 得到关联矩阵  $Y = (y_{ij})_{n \times (m-1)}$ 。

(3)通过  $R = \sum_{k=1}^n w \times Y$  得到最终微网电能质量综合评估结果。

## 2 LabVIEW 的监测评估系统构成

基于 LabVIEW 的监测评估系统由以硬件为主的信号采集平台和以 LabVIEW 程序为主的电能质量监测评估软件两大部分构成,系统构成示意图如图 1 所示。信号采集平台包括信号调理电路和数据采集卡。来自目标微网电能质量监测点的实时电压、电流模拟信号,需要运用信号调理电路将其调理成  $\pm 10\text{ V}$  的标准信号输出给数据采集卡。信号调理电路主要包括电压、电流互感器、隔离放大器、抗混叠滤波器,既能实现信号的调理,也能实现电气隔离和简单的抗干扰。而数据采集卡负责将模拟信号转换为数字信号并输入到计算机中。作为 LabVIEW 软件的衍生品,有专门与计算机相连的 PCI 接口<sup>[7-8]</sup>。

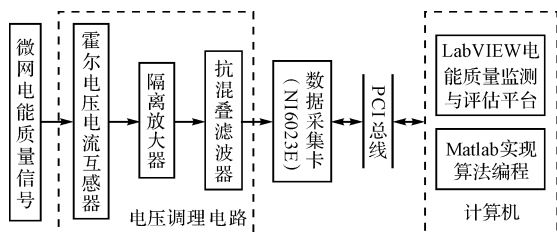


图 1 微网电能质量监测评估系统构成示意图

系统软件除了能实现微网的信号分析、指标计算和质量综合评估,以及现场显示、存储和远程监测外,还可生成一份既包含各个单项质量指标,还包含综合评估结果的专业微网电能质量评估报表。电能质量各指标主要包括电压偏差、频率偏差、谐波含量、电压波动和闪变、三相不平衡度、电压暂降、短时过电压、短时中断,综合评估采用基于改进的 AHP 法和灰色理论。本研究在系统设计中引入了虚拟仪器和电能质量综合评估概念,设计开发的目标是除具有一般电能质量参数常规参数监测功能外,还具有包括单项指标评估、综合评估功能的完整微网电能质量评估系统。

## 3 监测评估系统软件设计

### 3.1 系统软件总流程

微网电能质量监测评估系统软件的程序结构图如

图 2 所示。系统软件基于 LabVIEW 平台开发,采用模块化的编程方式。该软件先将由硬件采集到的微网现场信号经过简单的显示处理,完成电压、电流的实时监测。然后,进入单项指标评估模块,由各自算法进行稳态和暂态指标的分析,由此可完成微网电能质量的单项指标评估功能。最后,由综合评估模块结合各个单项指标计算值得到综合指标,完成对微网电能质量的综合评估,并由程序输出电能质量的报表。

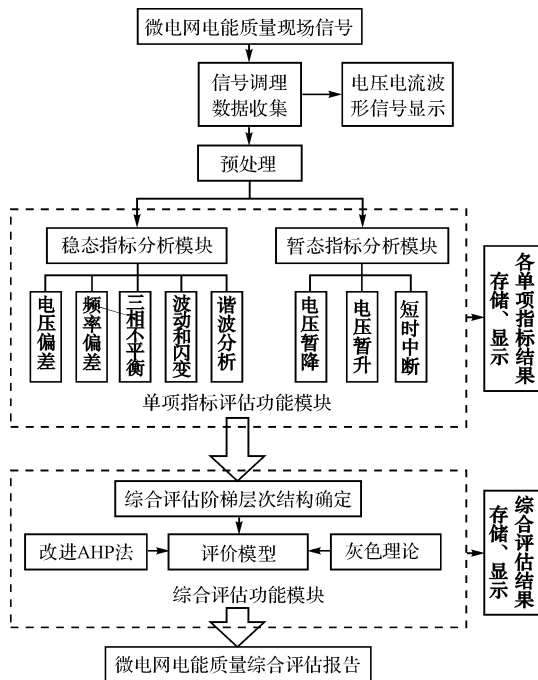


图 2 微网电能质量监测评估系统程序结构图

在系统软件实现过程中,电能质量监测评估软件采用 LabVIEW 平台与 Matlab Script 进行混合编程开发。基于 LabVIEW 语言实现电能质量复杂指标计算和综合评估算法相当困难,而 Matlab 软件具有强大的数据运算和编程功能、丰富的内置函数以及开放的跨平台接口。LabVIEW 和 Matlab Script 结合的混合编程具有脚本打开速度快、满足多输入多输出、单次处理信息大、编程方法简单实用的优点<sup>[9-10]</sup>。通过利用 ActiveX 控件和 Matlab Server 实现通信,调用 Matlab 函数命令的过程实际是将 Matlab 当作一个 ActiveX 服务器,通过 ActiveX 这样一个通道将进行命令发送,由 Matlab 在后台完成执行。

### 3.2 微网电能质量监测评估软件界面

LabVIEW 作为虚拟仪器的软件平台,其界面风格偏向于真实的仪器界面。为了防止在一个界面上因为集成了过多的按钮、显示窗口等而显得特别混乱,系统采用了 LabVIEW 前面板中的标签页显示方式,根据不同模块、不同功能集成各种显示窗口、文本框。系统软

件界面包含 7 个功能窗口：①实时波形显示窗口。用于微网电压、电流信号的实时显示，包括录波回放、越限示警等功能；②电压偏差、波动和闪变窗口。测量微网电压偏差、波动和闪变指标值；③频率偏差及三相不平衡度窗口。用于显示微网频率偏差以及三相之间的不平衡程度；④频谱及谐波分析窗口。包含微网信号的频谱分析图表、谐波含量直方图、显示频率总畸变度和具有代表性的各次谐波；⑤暂态指标窗口。包括电压暂降、暂升和短时中断的能量值指标计算值；⑥综合评估模块窗口。计算各指标权重以及综合评价指标值和评价结果，并对相关数据进行记录；⑦报表窗口。用于微网电能质量评估报表的生成、显示和查询等。

微网电能质量监测评估软件中电压信号的频谱及谐波分析界面如图 3 所示。该功能窗口含有 A 相电压的实时显示、幅频特性界面和谐波含量柱状图，同时显示谐波的总畸变度以及具有代表性的 3、5、7、9 次谐波幅值。

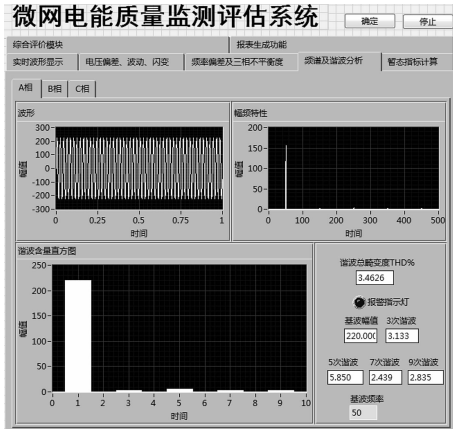


图 3 电能质量监测评估软件谐波分析界面

### 3.3 单项指标评估模块

系统单项指标评估模块主要包括电压指标测量模块(含电压偏差、三相不平衡度、电压波动和电压闪变)、频率指标测量模块(含频率偏差、频谱分析和谐波)、暂态指标模块(含电压暂降、暂时过电压和暂时中断)。由于 Matlab 对于计算和信号处理更具专业性,本研究采用 LabVIEW 和 Matlab 混合编程方法计算,用 Matlab Script 节点在 LabVIEW 中完成函数调用,运用小波降噪来提高系统基频测量精确度,利用 bilinear 函数获取滤波器模板程序 IIRFilter.vi 参数等。

稳态指标算法主要采用相关国标中的公式编程所得,LabVIEW 中有许多信号测量小模块,可以精确获得相关电能质量指标。而对于电压暂降、电压暂升和短时中断这 3 种暂态指标,则定义统一的“能量化指标”来描述<sup>[11]</sup>：

$$E_{\text{vst}} = lg \left\{ \int_0^T \{ 1 - [V(t)/V_{\text{nom}}]^2 \} dt \times 100 \right\} + \lambda_i \quad (3)$$

式中： $E_{\text{vst}}$ —一个无量纲的短时电压波动能量值； $T$ —短时电压变动持续时间； $V(t)$ —内的电压幅值； $V_{\text{nom}}$ —正常时的电压幅值；经计算分析，电压暂降、暂升和短时中断能量指标中  $\lambda_i$  的取值分别对应  $\lambda_1 = 0.0915$ ， $\lambda_2 = \lambda_3 = 2.0$ 。利用 Matlab Script 节点，可完成暂态指标的编程计算。软件中谐波分析模块的程序截图如图 4 所示。

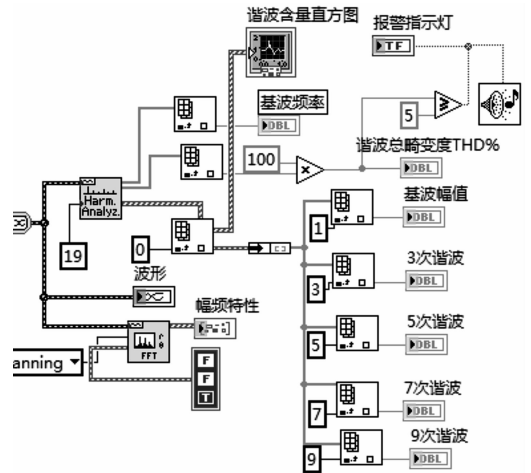


图 4 谐波分析模块程序

### 3.4 综合评估功能模块

#### 3.4.1 综合评估案例

本研究通过对浙江工业大学微网实验平台进行测量,得到#1 和#2 处的两组电能质量数据,输入到系统软件处理后,可得特征指标数据如表 2 所示。

表 2 #1,#2 点的电能质量特征指标

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
#1	0.81	0.12	1.23	0.84	1.35	3.46	2.43	2.21	0.09
#2	0.78	0.10	1.43	0.85	1.46	3.33	2.76	2.43	0.05

$X_1 \sim X_9$ —电压偏差、频率偏差、电压波动、电压闪变、三相不平衡、谐波畸变及电压暂降、电压暂升和短时中断 9 个电能质量指标。其中,频率偏差单位为 Hz,动态指标为无量纲的能量值,其余为百分比值。

通过在 Matlab Script 中进行前述改进的 AHP 法以及灰色理论中各步骤的算法编程计算,并将计算结果返回 LabVIEW 中,可得权重向量为  $w = \{0.116, 0.224, 0.137, 0.124, 0.126, 0.108, 0.035, 0.034, 0.036\}$ ,#1,#2 点电能质量综合评估结果为 0.7095,0.6949。

本研究通过对优、良、合格及较差 4 个标准临界样本进行综合评估,将所得电能质量综合评估指标作为电能质量评级界限。理想值为 1,而优质临界样本的综合评估指标为 0.8082,所以优质电能质量的综合评估指标在  $[0.8082, 1]$  区间内。#1,#2 点综合评估指标在  $[0.6713, 0.8082]$  区间内,其电能质量综合评估等级属于“良”,可判断该案例微网的电能质量综合水平良好。

3.4.2 微网电能质量综合评估报表

表。案例微网#1 点的电能质量评估报表如表 3

综合评估模块将产生一份微网电能质量评估报

所示。

表 3 案例微网电能质量评估报表

采集时间:2014.3.20

电压等级:380 V

单项指标	指标计算值	权重	备注
电压偏差/(%)	0.81	0.116	>35 kV ±10% ≤10 kV ±7% 单项 220 V, ±7%, -10%
频率偏差/Hz	0.12	0.224	正常 ±0.2 Hz 容量 >5 000 MW ±0.5 Hz
电压波动/(%)	1.23	0.137	LV, MV 2%; HV 1.5%
电压闪变 Ps (%)	0.84 (%)	0.124	LV 1.0%; MV 0.9%; HV 0.8%
三相不平衡/(%)	1.35	1.26	正常 2%; 短时 4%
谐波含量/THD (%)	3.48	0.108	110,220 kV 2%; 35,66 kV 3%; 10,6 kV 4%; 0.38 kV 5%
电压暂降	2.43	0.035	合格值 <3.408
电压暂升	2.21	0.034	合格值 <2.92
短时中断	0.09	0.046	合格值 <2.318
综合评估	综合评估指标	0.709 5	优 >0.808 2 良 >0.671 3
专家意见	综合评估等级	良	合格 >0.505 0 较差 >0.337 6 差 <0.337 6
该电能谐波含量略高,精密仪器使用前可适当滤波			

注:LV: <1 kV; MV:1 kV ~ 35 kV; HV:35 kV ~ 220 kV

该报告主要包括各单项特征指标及其权重、综合评估指标及等级、相关说明性备注,最后由专家分析诊断、提出改善及应用方面的定性意见。

4 结束语

基于 LabVIEW 和 Matlab 混合编程方法设计的微网电能质量监测评估系统克服了现有电能质量监测装置对于电能质量综合评估方面的缺失。该系统既可以实现微网电能质量的实时监测及指标分析,又能实现包含电能质量的各单项指标计算和科学合理的综合评估功能。在微网逐渐兴起的今天,电能质量监测评估尤其重要,因此,该微网电能质量监测评估软件系统具有良好的市场前景。

参考文献 (References):

[1] 杨 进,肖湘宁. 电能质量监测技术发展新趋势——网络化,信息化,标准化[J]. 电力自动化设备,2005,24(11):82-87.  
 [2] 蔡海生,李清波. 一种新型电能质量在线监测装置[J]. 机电工程技术,2005,34(7):82-85.

[3] 卫蜀作,蔡 邠. 中国电网高速发展与可再生能源发电的关系[J]. 电网技术,2008,32(5):26-30.  
 [4] 蒋 威,吴建华. 基于 Matlab 和 LabVIEW 的电机控制系统集成开发[J]. 机电工程,2006,23(7):8-9.  
 [5] 潘 峰. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J]. 环境工程,2002,20(2):58-60.  
 [6] 雷 刚,顾 伟,袁晓冬. 灰色理论在电能质量综合评估中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):62-67.  
 [7] 李震梅,胡文军,饶明忠. 基于 LabVIEW 的电能质量检测和分析系统[J]. 电工技术杂志,2003(5):25-27.  
 [8] 张 华,管红根,桂成兵. 基于 LabVIEW 的火炮振动测试分析系统[J]. 2012,31(4):75-77,81.  
 [9] 胡佑兰,彭天好,朱刘英. Matlab 和 LabVIEW 混合编程及在控制系统中的应用[J]. 机床与液压,2009,37(10):209-212.  
 [10] 柴敬安,廖克俭,潘德辉,等. Labview 和 Matlab 混合编程方法的研究与实现[J]. 计算机测量与控制,2008,16(5):737-739.  
 [11] SHEN C C, WANG A C, CHANG R F, et al. Quantifying Disturbance Level of Voltage Sag Events[C]//Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: IEEE, 2005:2314-2318.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

沈 辉,谢志云,余子文,等. 基于 LabVIEW 的微网电能质量监测评估系统[J]. 机电工程,2014,31(9):1201-1205.

SHEN Hui, XIE Zhi-yun, YU Zhi-wen, et al. Power quality monitoring and evaluation system for micro-grid based on LabVIEW[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1201-1205.  
 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn