

Hilbert 变换在电压闪变检测中的应用

肖冰, 梁军, 路平, 负志皓

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 利用 Hilbert 变换 (HT) 对配电系统中的电压闪变水平进行检测, 并用等纹波滤波器来实现 HT。与文献中所用方法相比, 该文所用方法在数学上更简单, 实现更容易。HT 能够检测配电系统中的电压闪变和系统频率的变化, 精度高, 使电压闪变补偿装置更容易控制。采用了不同的电压闪变信号验证该方法。通过 Matlab 仿真, 简述了影响检测精度的不同因素。仿真结果验证了 HT 的检测能力, 表明 HT 在检测电压闪变方面具有良好的性能。

关键词: Hilbert 变换; 电压闪变; 等纹波滤波器; 电压包络检测

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)15-0062-04

0 引言

电压波动为一系列电压变动或连续的电压偏差。根据 IEC 标准^[1], 电压波动应在标称电压的 10% 之内。由于电压波动影响和危害着敏感的电力电子和控制设备, 它也属于检测电能质量优劣的标准之一。通常供电系统中电压波动和闪变多由用户波动性负荷 (如电弧炉) 所引起。闪变是人对照度波动的主观视感。人对照度波动的最大觉察频率范围不会超过 0.05 ~ 35 Hz, 最为敏感的频率区域范围约为 6 ~ 12 Hz^[2]。

检测电压闪变水平的方法有很多种。常见的闪变调制波检波方法可分为 3 种, 即半波有效值法、平方解调法和全波整流法。这几种方法都不适用于时变的电压闪变信号的检测与时频分析, 更适合于在模拟测量装置中应用^[2]。快速傅里叶变换 (FFT) 可用于电压闪变的检测^[3], 其主要缺点是信号被认为是稳定的, 把这种方法应用到非稳定信号时所得结果的精度会大大降低。为了避免这种局限性, 又提出了基于不同估算准则的方法, 如最小绝对值 (LAV) 状态估计^[4]和扩展卡尔曼滤波 (EKF)^[5]。尽管 LAV 和 EKF 对非稳定信号是有效的, 但它们仍有很大的缺陷。LAV 状态估计的主要缺陷是假定事先已知闪变频率, 而且这种方法收敛缓慢, 至少需要 3 个周波的时间才能得到正确的结果。因此这种方法对于在线检测和实现不太适合。EKF 需要大量的计算, 参数要求非常精确, 不容易实现。近年来, 又引用了小波变换 (WT) 来分析电压闪变^[6,7]。然而, 这种方法不仅计算复杂, 需要大批的处理过程, 而且合适的小波选择困难, 因此 WT 仅适合离线

诊断和分析。为了克服以上方法的缺陷, 本文提出了利用 Hilbert 变换 (HT) 对闪变进行估计和检测, 用等纹波滤波器来实现 HT。这种方法能够对电压进行准确快速检测, 而且容易实现。

1 电压闪变模型

通常将电压波动看成以工频电压为载波、其电压的方均根值或峰值受到以电压波动分量作为调幅波的调制。对于任何波形的调幅波均可看作是各种频率分量的合成。为使分析简化一开始先不考虑谐波, 在后面的部分再考虑谐波。如果忽略谐波成分, 电压闪变信号可用下式表达:

$$x(t) = [A_0 + \sum_{i=1}^M (A_i(t) \cos(\omega_i(t)t + \phi_i))] \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (1)$$

式中: A_0 是供电电压的标称幅值; ω_0 是供电系统基波角频率; ϕ_0 是供电电压基波相位角; A_i 是角频率为 ω_i 、相位角为 ϕ_i 的调幅波分量的幅值。与其对应的离散表达式为:

$$x(n) = \underbrace{[A_0 + \sum_{i=1}^M (A_i(n) \cos(\omega_i n + \phi_i))]}_{A_{\text{mod}}(n)} \cdot \cos(\omega_0 n + \phi_0) \quad (2)$$

这项研究的最终目的是检测和估计基波电压闪变的包络 $A(n)$, 这在估计电力网络中的闪变水平以及闪变补偿中是极为关键的一步。而且, 在实际的配电系统中, 系统频率围绕其标称值也会有一些波动。因此, 检测系统频率的变化也是 HT 的主要任务之一。求得电压闪变的包络 $A(n)$ 后, 进行简单的去除均值, 就可求得调幅波信号 $A_{\text{mod}}(n)$, 调幅波分

量及其幅值和频率可以通过其它方法进一步分析,例如小波分析、Pisarenko谐波分解、FFT等谱估计方法。

2 HT

2.1 HT基本原理

HT是信号分析中的重要工具。对一个具有傅里叶变换的实信号 $x(t)$,其 HT $\hat{x}(t)$ 定义为:

$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{t} \quad (3)$$

式中: *表示卷积。对应式(3),傅里叶变换为:

$$\hat{x}(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) x(\omega) \quad (4)$$

这里 $\hat{x}(\omega)$ 是 $\hat{x}(t)$ 的傅里叶变换。定义

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (5)$$

为信号 $x(t)$ 的解析信号。 $z(t)$ 的模和相位可用来估算 $x(t)$ 的幅值包络 $|A(t)|$ 和瞬时频率 $\phi(t)$ 。如式(6)、(7)所示:

$$|A(t)| = |z(t)| = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (6)$$

$$\phi(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arctan \left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \right) \right) \quad (7)$$

2.2 实现

为了实现 HT,设计了一个有限冲激响应滤波器(FIR)。本文采用了数字的形式来实现这个 HT-FIR滤波器,用 Remez交换算法和切比雪夫逼近理论可以设计一个具有奇对称系数的 HT-FIR滤波器。该设计方法可使频率响应的最大误差降到最小程度。由于这种滤波器的频率响应具有等纹波特性,因此称它为等纹波滤波器。FIR滤波器的转移

函数采用 $H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}$ 的形式。滤波器长度 N 影响 HT的检测速度和精度。为了研究滤波器长度的影响,本文采用了两种具有不同长度的滤波器:一种滤波器的长度 $N = 120$,另一种滤波器的长度 $N = 240$ 。

3 Matlab仿真验证

采用 Matlab进行仿真,采样频率为 $f_s = 3200$ Hz。采用了不同的电压闪变信号仿真验证该方法的精度。

3.1 常幅值常频率调幅波

假定一电压闪变信号为:

$$v(n) = [1 + 0.1 \cos(0.2 \pi n)] \cos(\omega_0 n) \quad (8)$$

图1和图2分别为滤波器长度为 $N = 120$ 和 $N = 240$ 的 HT检测的电压闪变。结果表明,对由常

幅值常频率调幅波调制的简单闪变,HT能够相当准确地估计闪变的有关参数。很明显,滤波器长度越大,电压包络的检测误差越小,但所需要的计算时间越长。表1是图1和图2两个仿真结果的比较,其中包括了窗函数的长度。窗函数的长度越大,表明所需的计算量越大,计算时间越长。

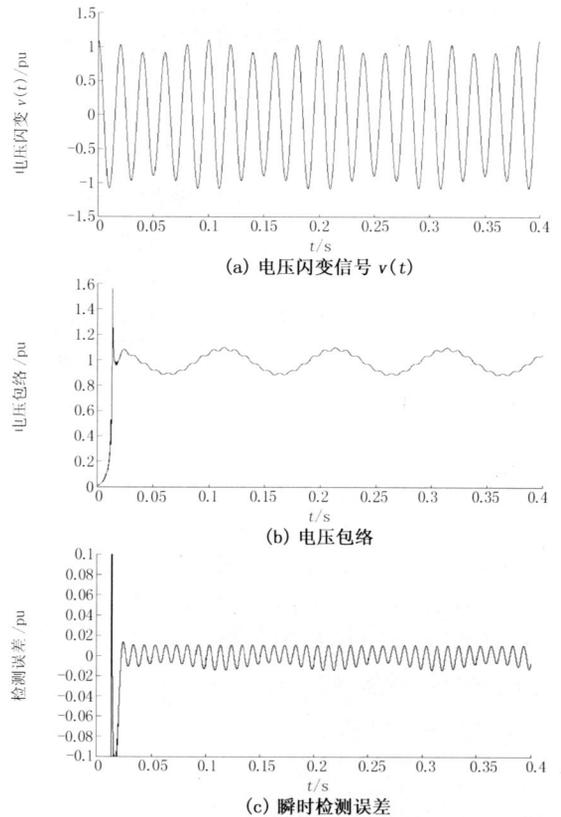


图1 $N = 120$ 的 HT检测的电压闪变

Fig 1 Voltage flicker detecting using HT with $N = 120$

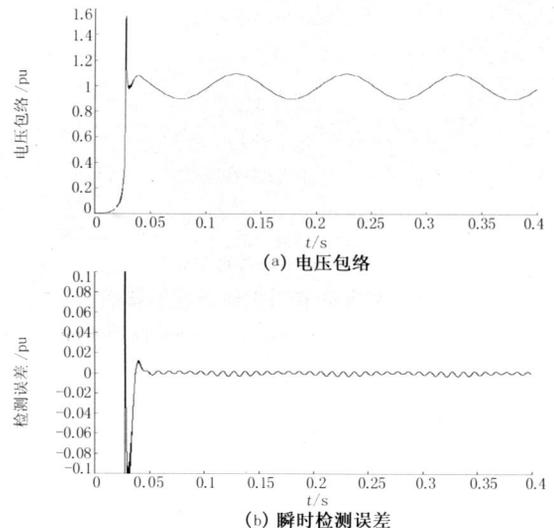


图2 $N = 240$ 的 HT检测的电压闪变

Fig 2 Voltage flicker detecting using HT with $N = 240$

表 1 $N = 120$ 和 $N = 240$ 的 HT在检测误差和窗函数长度之间的比较

Tab 1 Comparison of detecting error and window length using HT with $N = 120$ and $N = 240$

滤波器长度	窗函数长度	误差 $v\%$	误差 $f\%$
$N = 120$	120	1.073 1	2.205 5
$N = 240$	240	0.113 1	0.437 1

3.2 调幅波的幅值和频率变化对 Hilbert变换检测能力的影响

首先,保持调制频率不变,为系统标称频率的20%。为了说明该方法的适用性,调幅波信号的幅值变化范围可以大一些,在供电电压标称值的5%~50%之间变化,步长为5%。对闪变电压和系统频率的检测误差分别如图3(a)和(b)所示。其次,保持调幅波信号的幅值不变,为标称电压的10%。调制频率在系统标称频率的5%~50%之间变化,步长为5%。对闪变电压和系统频率的检测误差分别如图4(a)和(b)所示。

实验结果表明,调幅波信号的幅值和频率在一个较大的范围内变化时,本文方法的鲁棒性和准确度都很理想。即便在最严重的闪变情况下,电压检测误差也不超过3%。也可以看出,“ $N = 240$ ”的HT比“ $N = 120$ ”的HT的检测结果好的多,但却有一个相对较大的时间延迟。

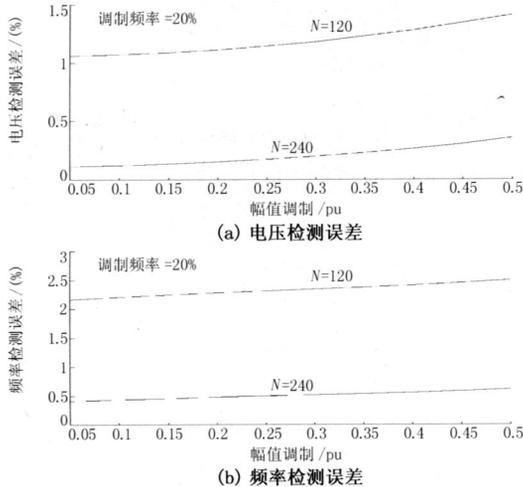


图 3 幅值调制对检测误差的影响

Fig 3 Effect of amplitude modulation on the detected error

3.3 由多种频率成分合成的调幅波

假定一电压闪变信号为:

$$v(n) = [1 + 0.1 \cos(0.05 \omega_0 n) + 1/30 \cos(0.15 \omega_0 n) + 0.02 \cos(0.25 \omega_0 n)] \cos(\omega_0 n) \quad (9)$$

图5和图6分别是“ $N = 120$ ”和“ $N = 240$ ”的HT对闪变电压包络的检测结果及检测误差。这些结果

都验证了该方法在检测具有复杂包络结构的闪变电压方面的有效性。

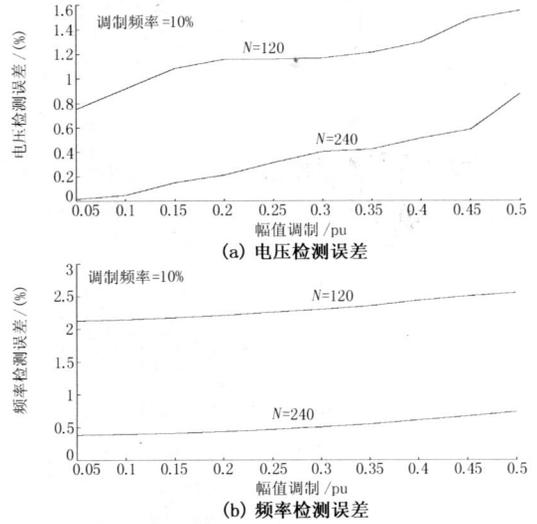


图 4 频率调制对检测误差的影响

Fig 4 Effect of frequency modulation on the detected error

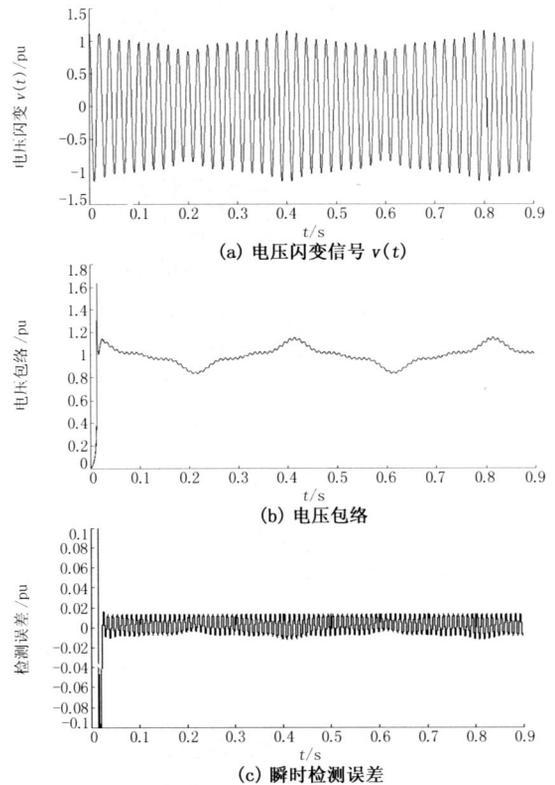


图 5 $N = 120$ 的 HT检测的电压闪变

Fig 5 Voltage flicker detecting using HT with $N = 120$

3.4 在基波信号中加入高次谐波

由于非线性负荷的存在,在电网中就会存在高次谐波。假定一电压闪变信号为:

$$v(n) = [1 + 0.1 \cos(0.05 \omega_0 n)] * [\cos(\omega_0 n) +$$

$$1/3\cos(3\omega_0 n) + 0.2\cos(5\omega_0 n) \quad (10)$$

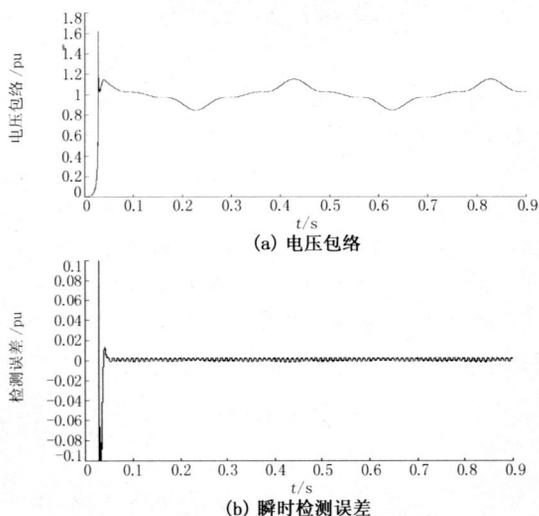
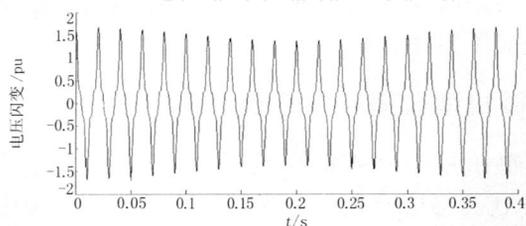
图6 $N=240$ 的HT检测的电压闪变Fig 6 Voltage flicker detecting using HT with $N=240$ 

图7 含有高次谐波的闪变

Fig 7 Flicker with higher harmonic distortion

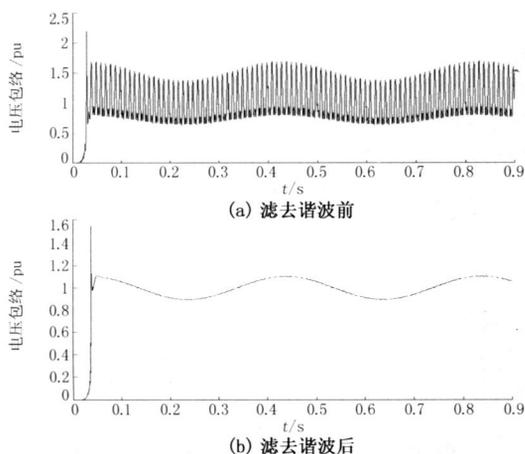


图8 滤去谐波前后电压包络的对比

Fig 8 Comparison of voltage envelope before and after filtering harmonic

图7给出了该闪变的一小段波形,可以看出有明显的谐波畸变。检测出的包络也将含有相同的谐波分量,如图8(a)所示。必须对含有高次谐波的电压闪变包络信号进行适当的滤波,可以通过低通滤

波器将高次谐波滤除。图8(b)为滤除高次谐波之后检测出的电压包络。

4 结论

本文采用了HT来对电压闪变进行检测,同时,由于供电系统频率也会偏离标称值,因此也对系统频率进行了检测。分别用了滤波器长度为 $N=120$ 和 $N=240$ 的FR滤波器对HT进行了验证。仿真结果验证了上述方法的准确性、有效性,而且容易实现。在任何闪变情况下检测误差都低于3%。进行HT时,采用的滤波器长度越大,对电压闪变信号包络和系统频率的检测误差越小,但所需的计算量越大,计算时间越长,延迟时间也越长。HT与EKF相比,计算量大大缩小,同时也克服了FFT的缺陷。

参考文献:

- [1] IEC 38: 1983, IEC Standard Voltages[S].
- [2] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京:中国电力出版社, 1998
SUN Shu-qin Voltage Fluctuation and Flicker[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [3] Srinivasan K. Digital Measurement of the Voltage Flicker[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6: 1593-1598
- [4] Soliman S A, El-Hawary M E. Measurement of Power Systems Voltage and Flicker Levels for Power Quality Analysis: a Static LAV State Estimation Based Algorithm[J]. Int J Elect Power Energy Syst, 2000, 22: 447-450
- [5] Girgis A, Makram E B. Measurement of Voltage Flicker Magnitude and Frequency Using a Kalman Filtering Based Approach[J]. Proc IEEE Can Conf Elect Comput Eng, 1996, 2: 659-662
- [6] 周兆经, 周文晖, 李青. 采用小波分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(6): 23-27.
ZHOU Zhao-jing, ZHOU Wen-hui, LI Qing. A New Method for the Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Transform and Synchronous Detection[J]. Proceedings of the Electric Power System Automation, 2001, 13(6): 23-27.
- [7] 张宇辉, 陈晓东, 刘思革. 采用小波包分析和拟同步检波的电压闪变信号检测新方法[J]. 继电器, 2004, 32(3): 6-9.
ZHANG Yu-hui, CHEN Xiao-dong, LI Si-ge. Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Package Analysis and Simulating Synchronous Detection[J]. Relay, 2004, 32(3): 6-9.

(下转第70页 continued on page 70)

4 结论

本文指出了原有电压判据存在的问题,并引入模糊神经网络,结合模糊控制与神经网络各自的优点,将其应用于单相自动重合闸中,实现智能型自适应单相自动重合闸,从仿真结果可看出,此方案具有可行性。

参考文献:

- [1] 袁越,张保会. 电力系统自动重合闸研究的现状与展望[J]. 中国电力, 1997, 30(10): 45-47.
YUAN Yue, ZHANG Bao-hui Present State and Prospect of Power System Automatic Recloser Research[J]. Electric Power, 1997, 30(10): 45-47.
- [2] 孙增圻,等. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社,广西科学技术出版社, 2002
SUN Zeng-qi, et al Intelligent Control Theory and Technology[M]. Beijing: Qinghua University Press, Guangxi Science and Technology Press, 2002
- [3] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996
GE Yao-zhong New Types of Protective Relaying and

Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1996

- [4] 闻新,周露,李翔,等. MATLAB神经网络仿真与应用[M]. 北京:科学出版社, 2003
WEN Xin, ZHOU Lu, LI Xiang, et al MATLAB Simulation and ANN[M]. Beijing: Science Press, 2003
- [5] GE Yao-zhong, SU I Fong-hai, XIAO Yuan Rediction Methods for Reventing Single-phase Reclsing on Pemanent Fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.

收稿日期: 2004-11-10

作者简介:

杨伟(1965-),男,副教授,从事电力系统及其自动化方面的教学与研究工作; E-mail: yangwei4320@sina.com

彭丽(1978-),女,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

张俊芳(1965-),女,副教授,主要从事电力系统自动化方面的研究工作;

吴军基(1955-),男,教授,博士生导师,从事电力系统及其自动化、电力市场等方面的教学与研究工作。

Adaptive autoreclosure of single phase based on FNN

YANG Wei, PENG Li, ZHANG Jun-fang, WU Jun-ji

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Autoreclosure is a piece of very important equipment that guarantee security operation of power line and improve reliability of power supply, so the autoreclosure is widely applied in transmission line. However, autoreclosure has not the ability to distinguish instantaneous faults and permanent faults presently. When autoreclosure recloses on permanent faults, there will be a severe harm to power system. The paper mainly research single-phase adaptive autoreclosure based on FNN, namely autoreclosure can distinguish instantaneous faults and permanent faults

Key words: power system; single-phase faults earth; adaptive autoreclosure; FNN

(上接第 65 页 continued from page 65)

收稿日期: 2004-11-10; 修回日期: 2005-03-01

作者简介:

肖冰(1980-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统

运行与控制; E-mail: ice_119_angel@mail.sdu.edu.cn

梁军(1956-),男,教授,主要从事电力系统运行与控制方向的研究。

Application of Hilbert transform in voltage flicker detecting

XIAO Bing, LIANG Jun, LU Ping, YUN Zhi-hao

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Hilbert transform (HT) are introduced in this paper as an effective approach for detecting voltage flicker levels in distribution systems. To implement the HT, an equiripple filter is designed. Compared with the commonly used algorithms in the literature, the proposed technique is simpler in mathematics, and is implemented easily. Moreover, the HT is capable of detecting the variations of the voltage flicker and supplying frequency with high precision in distribution systems. Such accurate detecting facilitates the implementation of the control of flicker mitigation devices. Many different voltage flicker signals are adopted to validate the approach. Matlab simulations of the proposed approach for detecting voltage flicker that profile the different factors affecting detecting accuracy are presented. The simulation results are provided to verify the detecting capabilities of the HT and indicate its superior performance in detecting voltage flicker.

Key words: Hilbert transform; voltage flicker; equiripple filter; voltage envelope detection