

一种基于局部均值分量法的电压波动包络线检测方法

为实现电压波动闪变的快速准确测量，提出一种基于局部均值分量法的电压波动包络线检测方法。介绍了传统的平方检测法和局部均值分量法的原理，用LabVIEW编写程序，模拟多组闪变信号并进行检测。通过仿真验证，结果证明局部均值分量法相对于平方检测法有更高的准确度，在波动信号接近工频偶数倍时准确度较高，接近工频奇数倍时，准确度降低。对单频率闪变信号、多频率闪变信号和含谐波闪变信号分别进行了仿真，结果证明局部均值分量法在各种信号条件下均有较高的准确度，并且所需运算时间较短。

陈 鹏 陈晓宁 黄立洋 顾超超/解放军理工大学国防工程学院

0 引言

冲击性负荷、大功率设备易导致电压波动和闪变，谐波、间谐波的叠加也会给电压波动造成很大影响。电压波动和闪变会破坏电力系统的稳定性，有可能使许多电气设备无法正常工作，使电气设备受到损伤，给工业生产、人们生活带来严重损失^[1]。随着各种精密电子设备的大量应用，电压波动和闪变的检测越来越受到重视，对供、用电系统中的电压波动闪变进行准确测量，可以为研究闪变根源、抑制和消除电压波动及闪变的影响提供依据，具有重要的意义。

传统的检测方法包括平方解调法、整流检测法和有效值检测法，平方检测法是国际电工委员会（International Electrical Commission, IEC）推荐的，该检测方法主要考虑电压波动造成灯光照度不稳定引起的人眼视感度变化，而

0.05 ~ 35 Hz是人能够察觉到的白炽灯光照变化频率范围，平方检测法无法对频率大于85 Hz的波动分量进行准确测量^[2]。

目前，荧光灯因节能效果好、寿命长等优点广泛代替白炽灯，白炽灯在日常生产生活中已很少见，荧光灯的特点之一是光照随频率变化不明显，人们难以察觉。而精密电子设备对电压波动越来越敏感，对电压波动测量准确度要求也随之提高，特别是对35 Hz以上电压波动的测量是很有必要的。此外，平方检测法对单一频率电压波动的检测较为准确，但对多频率电压波动检测误差较大。因此，近年来，人们又研究了一些新的方法，如小波变换法、小波包分析法、基于无功功率理论的检测方法以及独立分量分析法与Hilbert-Huang变换法等^[3]，这些方法在检测准确度、运算速度和抗干扰能力等方面有了不同程度的提高。

电压波动闪变检测的关键技术是提取包络线，本文提出一种基于局部均值分量法^[4]的电压波动包络线检测方法，该方法是一种自适应时频分析方法，不仅分解速度快，而且能够很好地抑制端点效应。本文用LabVIEW编写程序，模拟多组闪变信号并进行检测，进行了仿真验证，并与平方检测法进行比较，对单频率闪变信号、多频率闪变信号和含谐波闪变信号分别进行了仿真，验证局部均值分量法在电压波动包络线检测上的准确性。并且该方法检测速度快，可以应用于实时检测。



陈 鹏/硕士研究生

关键词/Keywords

电压闪变 ·
局部均值分量法 ·
LabVIEW ·

国家自然科学基金资助课题（51277182）。

1 平方检测法原理

1986年, IEC推荐了一种基于平方检测法的闪变检测方法, 一直以来被广泛应用, 其原理框图^[5]如图1所示。

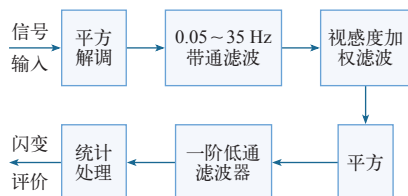


图1 IEC推荐平方检测法检测原理框图

电压波动信号模型可以用以工频电压为载波、电压波动分量为调幅波的调制波来模拟, 电压波动分量通常为间谐波, 可以是单一频率分量, 也可以是多种频率分量的合成^[6]。其数学表达式为

$$u(t) = U_0 \left[1 + \sum_{i=1}^k m_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1)$$

式中, U_0 为工频载波电压幅值; ω_0 为工频载波电压角频率; θ_0 为工频载波初相位; m_i 为调幅波电压幅值系数; ω_i 为调幅波电压角频率; θ_i 为调幅波初相位。为分析方便, 单一信号闪变的简化模型表达式为

$$u(t) = U_0 (1 + m \cos \omega_1 t) \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

用平方解调法^[7]处理后得到

$$\begin{aligned} u^2(t) = & \frac{U_0^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) + m U_0^2 \cos(\omega_1 t) - \frac{m^2 U_0^2}{4} \cos(2\omega_1 t) + \\ & \frac{U_0^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \cos(2\omega_0 t) + \frac{m^2 U_0^2}{8} \cos(2\omega_1 + 2\omega_0)t + \\ & \frac{m^2 U_0^2}{8} \cos(2\omega_1 - 2\omega_0)t + \frac{m U_0^2}{2} \cos(2\omega_0 + \omega_1)t + \\ & \frac{m U_0^2}{2} \cos(2\omega_0 - \omega_1)t \end{aligned} \quad (3)$$

通过0.05~35 Hz的带通滤波器后, 信号还保留 $m U_0^2 \cos(\omega_1 t)$ 和 $\frac{m^2 U_0^2}{4} \cos(2\omega_1 t)$ 分量, 通常调幅波电压幅值系数 m 较小, 因此 $\frac{m^2 U_0^2}{4} \cos(2\omega_1 t)$ 分量可以忽略, 电压波动信号 $m U_0^2 \cos(\omega_1 t)$ 可以检测出来。

2 局部均值分量法检测原理

电压波动与闪变检测的关键在于提取电压波动包络线, 因此可以考虑用局部均值分量法(Local Mean Decomposition, LMD)进行处理, LMD是Smith^[4]在2005年提出的一种新的自适应时频分析方法, 该方法不仅分解速度快, 而且能够很好地抑制端点效应。因此, LMD非常适合处理多分量的调幅-调频信号, 并同时得到瞬时幅值和频率信息。LMD方法已经成功应用于脑电图的信号处理和齿轮故障诊断^[8]等领域, 获得了较好的效果。

由于LMD不需要复频计算, 因此比Hilbert变换等方法速度更快, 比平方检测法少了滤波器引起的误差, 准确度更高, 在电压闪变检测方面优势较为明显。

它的原理是根据信号的包络特性, 将复杂的多分量信号分解为若干个乘积函数(Production Function, PF)的线性组合, 每一PF分量由一个包络信号和一个调频信号相乘得到, 包络信号就是该PF分量的瞬时幅值, 而PF分量的瞬时频率则可由纯调频信号直接求出, 进一步将所有PF分量的瞬时频率和瞬时幅值组合, 便可以得到原始信号完整的时频分布。

具体实现过程^[9]如下。

1) 对输入初始信号 $u(t)$, 求其所有的局部极值点 x_i , 计算相邻两个点的平均值 m_i , 即

$$m_i = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \quad (4)$$

将所有的 m_i 相连, 再用滑动平均法进行平滑处理, 即

$$m_i = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=i-N}^{i+N} m_k \quad (5)$$

得到局部均值函数 $m_{11}(t)$ 。

2) 求得包络估计值 a_i , 即

$$a_i = \frac{|x_i - x_{i+1}|}{2} \quad (6)$$

将所有的估计值 a_i 相连, 再用滑动平均法进行平滑处理, 得到包络估计值函数 $a_{11}(t)$ 。

3) 将 $m_{11}(t)$ 从初始信号 $u(t)$ 中分离出来, 得到一个新信号 $h_{11}(t)$

$$h_{11}(t) = u(t) - m_{11}(t) \quad (7)$$

4) 对 $h_{11}(t)$ 进行解调, 得到调频函数 $s_{11}(t)$

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \quad (8)$$

理想情况下, $s_{11}(t)$ 为纯调频函数, 即 $|s_{11}(t)| \leq 1$, 包络估计函数 $a_{11}(t) = 1$ 。事实上, $s_{11}(t)$ 和 $a_{11}(t)$ 几乎不可能满足上述条件, 需要将 $s_{11}(t)$ 作为原始数据继续进行上述迭代过程, 直到满足 $|s_{1k}(t)| \leq 1$ 和 $|a_{1k}(t)| = 1$ 为止。

5) 把所有的包络估计值相乘得到包络函数信号

$$a_1(t) = \prod_{i=1}^k a_{1i}(t) \quad (9)$$

6) 将包络信号 $a_1(t)$ 和纯调频信号 $s_{1k}(t)$ 相乘便可得到原始信号的第一个PF分量

$$PF_1(t) = a_1(t)s_{1k}(t) \quad (10)$$

$PF_1(t)$ 即为最高频率的分量, 包络信号 $a_1(t)$ 为分量的瞬时幅值, 频率可以用直接法^[10]由 s_{1k} 求得。设 $s_{1k}(t) = \cos \varphi(t)$, 则频率为

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{d \arccos[s_{1k}(t)]}{dt} \quad (11)$$

即

$$f(t) = \frac{-1}{2\pi\sqrt{1-s_{1k}^2(t)}} s'_{1k}(t) \quad (12)$$

7) 将第一个PF分量 $PF_1(t)$ 从初始信号 $u(t)$ 中分离, 再重复步骤1) ~ 6), 将其他PF分量分离出来, 直至剩余量足够小为止, 即

$$u(t) = \sum_{i=1}^k PF_i(t) + v(t) \quad (13)$$

式中, $v(t)$ 接近于0; $u(t)$ 被完全分解为调幅调频信号组合, 可以得到清晰的时域分布。

LMD的原理框图如图2所示。

3 仿真实验

LabVIEW是一种图形化编程语言, 不仅可以节省大量的编程工作, 而且具有强大的信号分析和数学运算功能, 能与Matlab、C语言等进行混

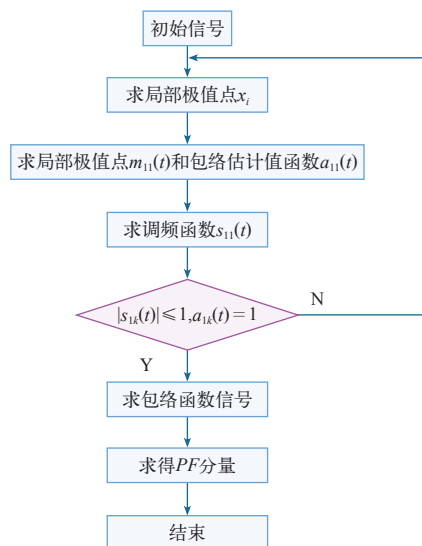


图2 LMD原理框图

合编程。它的信号处理模块有大量的子VI, 便于实现各种功能, 因此, 本文采用LabVIEW进行仿真。

3.1 单一闪变信号检测

设初始信号如下

$$u(t) = (1 + 0.1 \cos 20\pi t) \cos 100\pi t \quad (14)$$

采样频率为1 000 Hz, 采样时间为1 s, 闪变信号为10 Hz, 电压波动系数为0.1, 分别用平方检测法和LMD进行检测, 解调出包络线后除去直流分量, 进行对比分析, 结果如图3~图5所示。

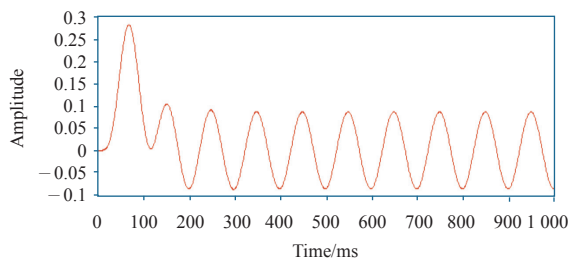


图3 平方法检测包络线

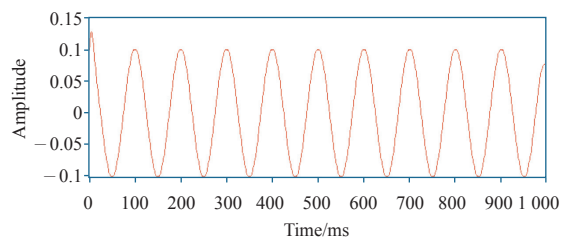


图4 LMD解调包络线

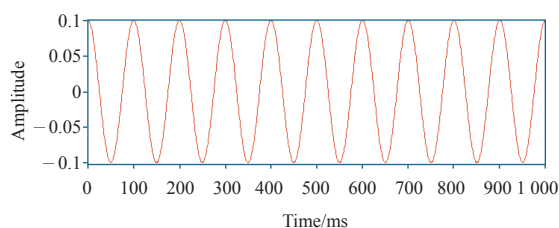


图5 理论包络线

通过图3~图5的对比, LMD解调出的包络线更接近理论值, 而且抑制端点效应更明显。

在不同频率闪变信号条件下, 将通过以上两种方法得到的电压波动平均值进行对比。如表1和表2所示。

表1 频率为5~15 Hz时, 两种方法测量值对比

频率 /Hz	平方法测量值 /V	平方误差 (%)	LMD测量值 /V	LMD误差 (%)
5	0.085 5	14.50	0.098 8	1.25
6	0.098 5	1.50	0.098 7	1.35
7	0.099 5	0.50	0.098 0	2.00
8	0.099 6	0.40	0.097 8	2.20
8.8	0.099 6	0.40	0.096 8	3.20
9	0.099 4	0.60	0.097 1	2.90
10	0.098 4	1.60	0.095 3	4.75
11	0.095 5	4.50	0.095 7	4.30
12	0.089 5	10.50	0.095 6	4.40
13	0.083 2	16.80	0.098 5	1.50
14	0.071 3	28.75	0.098 3	1.70
15	0.066 4	33.65	0.096 4	3.65

表2 不同频率下LMD测量值及误差

频率 /Hz	LMD测量值 /V	LMD误差 (%)	频率 /Hz	LMD测量值 /V	LMD误差 (%)
16	0.092 7	7.32	35	0.084 5	15.54
17	0.091 8	8.22	40	0.084 1	15.95
18	0.091 2	8.79	50	0.082 6	17.40
19	0.090 0	10.00	60	0.082 6	17.40
20	0.089 7	10.26	70	0.085 5	14.49
21	0.088 3	11.75	80	0.088 3	11.75
22	0.089 3	10.70	90	0.093 8	6.16
23	0.088 8	11.17	100	0.100 0	0.00
24	0.088 4	11.63	110	0.093 8	6.16
25	0.088 1	11.87	120	0.088 5	11.49
26	0.085 9	14.14	130	0.086 0	14.04
27	0.087 3	12.68	140	0.083 7	16.32
28	0.086 9	13.10	150	0.083 5	16.46

(续)

频率 /Hz	LMD测量值 /V	LMD误差 (%)	频率 /Hz	LMD测量值 /V	LMD误差 (%)
29	0.086 5	13.49	160	0.084 2	15.77
30	0.086 2	13.81	170	0.087 0	12.96
31	0.085 5	14.49	180	0.0895	10.49
32	0.085 5	14.52	190	0.093 8	6.16
33	0.085 1	14.86	200	0.100 0	0.00
34	0.084 8	15.23			

由表1可以看出, 平方检测法在频率为8.8 Hz左右测量准确度较高, 随着频率增大或减小误差增大, LMD法总体准确度要高于平方检测法。由表2可以看出, LMD法在电压波动频率接近工频偶数倍时准确度较高, 在接近工频奇数倍时准确度降低。

3.2 多频率闪变信号检测

设初始信号如下

$$u(t) = (1 + 0.1\cos 10\pi t + 0.075\cos 20\pi t + 0.05\cos 30\pi t)\cos 100\pi t \quad (15)$$

闪变信号由频率为5 Hz、10 Hz和15 Hz三个信号混合而成, 仿真结果如图6所示。

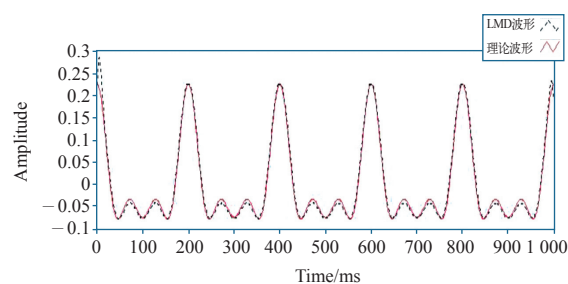


图6 LMD测得包络线与理论值对比

通过比较, 多频率闪变信号条件下, LMD测得的包络线函数曲线仍然较为接近理论值, 电压波动误差为4.23%, 准确度较高。

3.3 含谐波信号检测

设初始信号如下

$$u(t) = (1 + 0.1\cos 20\pi t + 0.075\cos 40\pi t + 0.05\cos 70\pi t)(\cos 100\pi t + 0.05\cos 300\pi t + 0.05\cos 500\pi t) \quad (16)$$

在多频率闪变信号基础上, 添加了3次谐波和5次谐波信号, 仿真结果如图7所示。

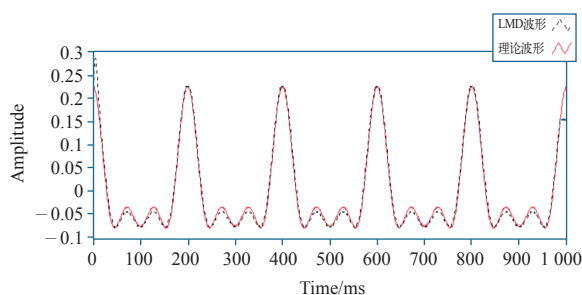


图7 含谐波信号测得包络线与理论值对比

通过图7发现LMD法测得曲线与理论值比较接近,说明LMD法可以有效地避免谐波带来的干扰,电压波动误差为6.54%,虽然与不含谐波信号测量值相比误差更大,但准确度仍然较高。

3.4 程序运行时间

在LabVIEW仿真条件下,LMD法的运行时间小于5 ms,而傅里叶变换的运行时间约为20~30 ms,Hibert变换的运行时间约为100~200 ms。因此,LMD法在时间和算法复杂度等方面具有一定的优势,可以应用于电压闪变的实时检测。

4 结束语

本文提出了一种基于局部均值分量法的电压波动包络线检测方法,通过LabVIEW软件对电压波动闪变信号进行了仿真,并与平方检测法进行了比较。结果表明LMD法可以较为准确地对单一频率闪变信号、多频率闪变信号和含谐波闪变信号进行检测,在电压波动频率接近工频偶数倍时准确度较高,在接近工频奇数倍时准确度降低。并且LMD法算法简单,运行时间短,可以应用于电压闪变的实时检测。

参考文献

- [1] 栗时平,刘桂英.现代电能质量检测技术[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [2] Kim T, Powers E J, Mackgrady W. Detection of flicker caused by interharmonics [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58 (1): 152-160.
- [3] 魏晓璞,徐永海,肖湘宁.电压波动与闪变检测方法综述[J].电测与仪表,2009,46(4):1-5.
- [4] Smith S J. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2 (5): 443-454.
- [5] 唐求,滕召胜,高云鹏.基于S变换的平方检测法测量电压闪变[J].中国电机工程学报,2012,32(7):61-67.
- [6] 江辉,王晓强,彭建春.基于希尔伯特-黄变换的电压闪变测量方法[J].电网技术,2012,36(9):250-255.
- [7] 滕召胜,罗志坤,高云鹏.基于虚拟仪器的平方检测法电压闪变测量实现[J].仪器仪表学报,2011,32(8):1803-1809.
- [8] 程军圣,杨宇,于德介.局部均值分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用[J].振动工程学报,2009,22(1):76-84.
- [9] 贾秀芳,安海清,张韶光.基于局部均值分解法的闪变包络线提取方法[J].华北电力大学学报,2014,41(3):10-16.
- [10] 任达千,杨世锡,吴昭同.基于LMD的信号瞬时频率求取方法及实验[J].浙江大学学报,2009,43(3):523-528.

(收稿日期:2015-09-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告