

基于自适应陷波滤波器的谐波分析法

李功新^{1,2,3}, 黄彦婕⁴, 江修波²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;
3. 福建省电力有限公司, 福建 福州 350000; 4. 福建省电力有限公司 厦门电业局, 福建 厦门 361000)

摘要: 为提升介损角测量算法对于干扰因素的抑制效果, 提出了一种结合自适应陷波滤波器(ANF)的谐波分析法。ANF能有效滤除电压、电流波形中的整次谐波、间谐波和噪声分量, 准确实现基波分量的跟踪及基波频率的提取。谐波分析法基于ANF提取的基波分量和基波频率进行介损角计算。仿真结果表明, 结合ANF的谐波分析法在频率波动、谐波分量变化、白噪声影响、介损角真值变化、初相角变化等情况下都能取得较高测量精度。

关键词: 容性设备; 介质损耗角; ANF; 谐波分析; 滤波器; 仿真

中图分类号: TM 934.32

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.018

0 引言

介质损失角(下文简称介损角)正切是衡量电气设备绝缘性能的重要指标^[1]。在正常情况下, 容性设备的介损角的范围为0.001~0.02 rad, 是一个微小值, 实际测量时容易因测试方法的不准确或现场干扰而淹没真实值。因此, 研究高精度的介损角测量方法是介损角诊断绝缘性能研究的首要课题。

目前常用的数字化测量方法主要有谐波分析法、相关函数法、相位差法、过零时差法、正弦波参数法等^[2-4]。其中相位函数法、过零时差法只能针对基波正弦信号, 在实际应用中需前置滤波环节; 正弦波参数法计算量大, 而且在消除频率波动及噪声引起的误差方面不具备优势, 较少采用^[5]; 谐波分析法不受直流分量和谐波存在的干扰, 是目前较常用的方法, 然而非同步采样时存在频谱泄漏和栅栏效应影响^[6]。经进一步分析发现因频率波动而无法同步采样时, 信号初相角差异和谐波是造成测量误差的主要因素^[7], 同时传感器信号的长距离传输带来的随机噪声也必然影响着测量精度^[8]。另外, 电压、电流中可能存在的间谐波是谐波分析法无法滤除的误差。因此提高谐波分析法的测量精度需要: 准确跟踪电压、电流频率, 实现整周期采样; 预先滤除电压、电流波形中的整次谐波、间谐波、直流和噪声干扰。

本文提出了结合自适应陷波滤波器(ANF)的谐波分析法, 通过ANF滤除电压、电流信号中的整次谐波、间谐波、直流和噪声干扰, 实现基波提取和频率跟踪^[9], 并将提取的电压、电流基波波形的频率通过谐波分析法计算介损角, 从而增加介损角的测量精度。最后通过仿真分析验证了改进算法的有效性。

1 基于ANF的基波提取和频率跟踪

介损角在线监测时电压、电流均包含着各次谐

波分量、直流分量及噪声, 以电压为例有如下形式:

$$u(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_k) + A_0 + n(t) \quad (1)$$

其中, $A_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_k)$ 为各次谐波, k 为谐波次数, 当 k 取非整数时则表示该部分为间谐波; A_0 、 $n(t)$ 分别对应着直流分量及噪声, 采用ANF可以从中提取出基波分量和基波频率值^[10-12]。

1.1 ANF的基本算法

ANF的数学表达式如式(2)所示:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \theta^2 x = 2\xi[\theta^2 y(t) - \theta \dot{x}] \\ \dot{\theta} = -\gamma x[\theta^2 y(t) - \theta \dot{x}] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\dot{\theta}$ 为输入信号 $y(t)$ 的角频率的估计, $\dot{x}$ 为关于输入信号 $y(t)$ 的估计, γ 、 ξ 为决定ANF收敛速度和精度的2个重要参数。

当输入信号仅含基波分量, 即 $y(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ 时, ANF将有唯一解:

$$\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ A_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \\ \omega_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 采用ANF提取基波和跟踪频率

为从包含整次谐波、间谐波、直流分量及噪声的电压、电流中提取基波分量及频率, 对ANF的结构进行调整, 以电压为例, ANF变换为式(4):

$$\begin{cases} \ddot{x}_k + i^2 \theta^2 x_k = 2\xi_k \left\{ \theta^2 u(t) - \sum_{k=1}^N [x_k / (k\omega_1)] \right\} \\ \dot{\theta} = -\gamma x_1 \left\{ \theta^2 u(t) - \sum_{k=1}^N [x_k / (k\omega_1)] \right\} \end{cases} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4), 式(4)将有唯一解如下:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k) \\ A_k k\omega_1 \sin(k\omega_1 t + \varphi_k) \\ \omega_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

此时 ξ_k 、 γ 是决定ANF中第 k 次谐波分量及基

波频率的收敛速度和精度的参数。 $\hat{x}_k/(k\omega_1)$ 是第 k 次谐波分量的估计值, θ 仍为基波角频率。理论分析可知,将式(4)中的 k 依次取采集电压所包含的各次谐波分量次数,并将 k 取不同值的多个公式联立,即得到求解基波及其频率的公式。实际应用中 k 的取值应根据所服务的电网情况而定,若电网中所含谐波情况较为复杂,则 k 可以取若干个含量较高的谐波分量次数。同理,当电流含有各次谐波分量及噪声时,上述方法同样可以实现基波分量的提取。

2 谐波分析法

谐波分析法利用三角函数的正交性,将采样信号与基波频率正余弦函数进行周期积分,从而获得基波分量的幅值和相位信息。当信号周期为采样周期整数倍时,谐波分析法利用矩形或梯形插值将积分离散化,当采样周期足够小时,可以获得准确度很高的拟合积分效果。然而,实际信号频率一直处于波动状态,因而多数情况下信号周期不为采样周期整数倍,此时需要对积分离散方法进行调整,从而保证基波信息提取的准确性。包含谐波分量及直流分量的电压、电流可表示如下:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^N [U_{k1} \sin(k\omega t) + U_{k2} \cos(k\omega t)] \quad (6)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^N [I_{k1} \sin(k\omega t) + I_{k2} \cos(k\omega t)] \quad (7)$$

其中,等号右边第 1 项为直流分量,第 2 项为各次谐波分量。

以电压信号为例,其基波正、余弦分量分别如式(8)、(9)所示。

$$U_{11} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin \omega t d\omega t \quad (8)$$

$$U_{12} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos \omega t d\omega t \quad (9)$$

设实际信号周期 T 与采样周期 T_s 的关系为:

$$T = (L + e)T_s$$

其中, L 为整数, e 为正小数。

基于梯形插值对式(8)、(9)离散化,并对非整采样周期部分进行估算,根据 $\cos 2\pi = 1$ 、 $\sin 2\pi = 0$, 可得到如下结果:

$$U_{11} = \frac{1}{L+e} \sum_{i=0}^{L-1} \left[U(i) \sin \frac{2\pi i}{L+e} + U(i+1) \sin \frac{2\pi(i+1)}{L+e} \right] + \frac{e}{L+e} U(L) \sin \frac{2\pi L}{L+e} \quad (10)$$

$$U_{12} = \frac{1}{L+e} \sum_{i=0}^{L-1} \left[U(i) \cos \frac{2\pi i}{L+e} + U(i+1) \cos \frac{2\pi(i+1)}{L+e} \right] + \frac{e}{L+e} \left[U(L) \cos \frac{2\pi L}{L+e} + U' \right] \quad (11)$$

$$U' = U(L) + e[I(L+1) - I(L)] \quad (12)$$

其中, $U(i)$ 为电压信号在本计算周期内的第 i 个采样值, 即 $U(i) = u(iT_s)$; U' 为 T 时刻的电压估计值, 可利用式(12)所示的线性插值算法获得。根据相量夹角关系可计算出基波电压、电流的相位差 φ , 介损角 δ 为 φ 的余角, 可由下式获得。

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi = \frac{\pi}{2} - \langle U_1, I_1 \rangle = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{I_{11}U_{11} + I_{12}U_{12}}{\sqrt{U_{11}^2 + U_{12}^2} \sqrt{I_{11}^2 + I_{12}^2}} \quad (13)$$

其中, U_1, I_1 分别为基波电压、电流相量。

3 结合 ANF 的介损角测量

结合 ANF 和谐波分析法可得到计算介损角的新方法: 通过 ANF 从采集的电压、电流信号中提取基波波形和基波频率, 然后将所提取的分量代入谐波分析法进行计算, 如图 1 所示。

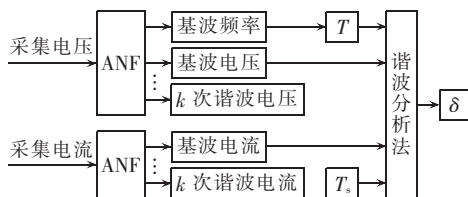


图 1 结合 ANF 的谐波分析法计算框图

Fig.1 Block diagram of harmonic analysis based on ANF

4 仿真分析

为验证本算法的有效性,采用文献[13-14]中的试验电路参数及信号参数。电容型设备等效电路中 $C = 591.02 \text{ nF}$, $R = 22.67 \Omega$ 。电压信号中包含基波、3 次谐波、5 次谐波,其表达式为:

$$u(t) = 220 \sin(2\pi f_0 t + 60^\circ) + 220 \times 1.088\% \sin(2\pi \times 3f_0 t + 45^\circ) + 220 \times 0.611\% \sin(2\pi \times 5f_0 t + 30^\circ) \quad (14)$$

其中,基波频率 $f_0 = 50 \text{ Hz}$ 。

4.1 信号基波提取及频率跟踪的仿真实验

在上述电压信号中添加能量为 1% 的随机白噪声作为 ANF 的输入 $u(t)$, 根据式(4)、(5)所列算法,提取基波信号 $\hat{x}_1/\omega_1$ 和基波频率 $\theta/(2\pi)$ 。由于上述电压中仅存在基波及 3、5 次谐波,式(4)中的 k 依次取 1、3、5, 即由 3 个式(4)所示的模块并联构成求解基波及其频率的算式, 3 个并联模块的参数设置分别为: $\gamma = 0.3$, $\xi_1 = 1.1$, $\xi_3 = 4$, $\xi_5 = 7.5$; 采样频率 10 kHz。本算法仿真中,先将电压、电流幅值化归到接近 1 的数值后输入 ANF, 输出时再将信号同比例放大。在此后的介损角计算仿真中, 仍对电压、电流信号做同样处理, 从而减小因电压、电流幅值在数量级上的差异造成的数值计算误差。

提取的基波波形如图 2 所示, 其中在 0.1 s、0.2 s

处分别设置了 2 次频率变换,使频率呈 50 Hz、50.5 Hz、49.5 Hz 的阶梯状。从图中可以看出,提取的基波除了在初始阶段与实际波形存在差异,在其他任意时刻都与实际波形准确地吻合。

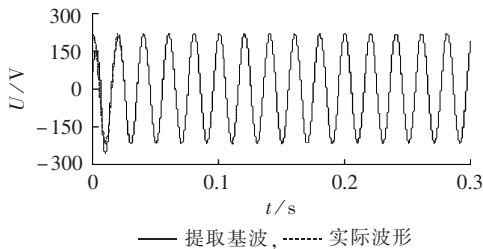


图 2 电压基波提取波形

Fig.2 Extracted fundamental voltage waveform

电压频率跟踪情况如图 3 所示,在频率突变时,该算法均能迅速跟踪到实际频率。频率由 50 Hz 变换到 50.5 Hz 时,跟踪到误差小于 0.1%,耗时 0.039 s;频率由 50.5 Hz 变换到 49.5 Hz 时,跟踪到误差小于 0.1%,耗时 0.049 s。

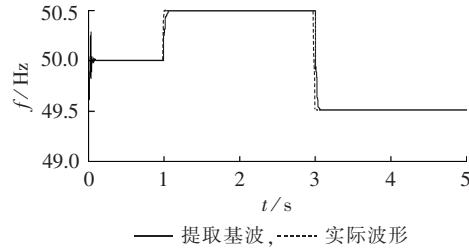


图 3 电压频率跟踪波形

Fig.3 Followed voltage frequency waveform

4.2 频率波动对介损角测量的影响

对本文所提出的介损角测量方法进行仿真,电网频率在 49.8~50.2 Hz 的范围内波动时,介损角测量误差见表 1^[13,15]。相较于文献[15]中采用的基于 Hanning 窗的 FFT 介损角测量方法和文献[13]中基于三角自卷积窗(TSCW)的 FFT 测量方法,本文所采用的结合 ANF 的谐波分析法能够有效抑制频率波动对介损角测量的影响,其介损角测量相对误差小于 0.003%,具有较高的介损角测量精度。

表 1 频率波动对介损角测量的影响

Tab.1 Influence of frequency fluctuation on dielectric loss angle measurement

基波 频率/Hz	δ 真值/ rad	相对误差/%			ANF 绝对 误差/rad
		Hanning 窗	TSCW	ANF	
49.8	0.004 192	3.80	0.138	2.3100×10^{-3}	9.6836×10^{-8}
49.9	0.004 201	2.14	0.127	2.4156×10^{-3}	1.0148×10^{-7}
50.0	0.004 209	0.24	0.114	2.4891×10^{-3}	1.0447×10^{-7}
50.1	0.004 217	2.38	0.099	2.5599×10^{-3}	1.0795×10^{-7}
50.2	0.004 226	4.75	0.083	2.6356×10^{-3}	1.1138×10^{-7}

4.3 谐波含量对介损角测量的影响

谐波含量越高对介损角测量的干扰越大,本文采用的算法针对该点预先消除谐波影响,提高介损

角在线测量精度。将电压信号式(14)中 3 次谐波含量由 0 变动至 8%,测量误差情况见表 2。仿真中基波频率 50.2 Hz,介损角真值 0.004 226 rad。如表 2 所示,相较于加 Blackman-Harris 窗的谐波分析法^[14]和基于 TSCW 的 FFT 测量方法^[13],结合 ANF 的谐波分析法能够有效抑制谐波对介损角测量的影响,实现介损角的准确测量。由于 ANF 消除整次谐波和间谐波的原理相同,因而本文算法在间谐波影响下同样能实现介损角的准确测量。

表 2 谐波含量对介损角测量的影响

Tab.2 Influence of harmonic content on dielectric loss angle measurement

3 次谐波 含量/%	Blackman-Harris 标准差/rad	TSCW 绝对 误差/%	ANF 绝对 误差/rad	ANF 相对 误差/%
0	3.09×10^{-5}	4.28×10^{-6}	1.4799×10^{-7}	3.5019×10^{-3}
2	4.77×10^{-5}	4.73×10^{-6}	6.0417×10^{-8}	1.4296×10^{-3}
4	5.04×10^{-5}	5.14×10^{-6}	7.0304×10^{-8}	1.6636×10^{-3}
6	6.41×10^{-5}	6.33×10^{-6}	2.4389×10^{-7}	5.7712×10^{-3}
8	7.22×10^{-5}	6.97×10^{-6}	4.6036×10^{-7}	1.0894×10^{-2}

4.4 介损角真值变化时测量的准确度分析

介损角越小对算法的准确度要求越高。实际介损角的变化范围为 0.001~0.02 rad,从中间隔选取不同的介损值进行仿真,测量误差情况如表 3^[14]所示。介损角真值在上述范围变化时,文献[14]采用的基于 Blackman-Harris 窗插值谐波分析法的误差标准差小于 4.5×10^{-5} rad,本文采用的算法测量误差绝对值小于 2.3091×10^{-7} rad,准确度提升了 2 个数量级。

表 3 介损角真值变化对介损角测量的影响

Tab.3 Influence of its actual value variation on dielectric loss angle measurement

δ 真值/ rad	Blackman-Harris 标准差/rad	ANF 绝对 误差/rad	ANF 相对 误差/%
0.004	4.00×10^{-5}	9.6363×10^{-8}	2.4090×10^{-3}
0.008	4.49×10^{-5}	6.8094×10^{-8}	8.5117×10^{-4}
0.012	4.29×10^{-5}	1.4702×10^{-7}	1.2252×10^{-3}
0.016	3.26×10^{-5}	2.3091×10^{-7}	1.4432×10^{-3}
0.020	3.82×10^{-5}	1.4916×10^{-8}	7.4580×10^{-5}

4.5 信号初相角变化对介损角测量的影响

当频率波动无法整周期采样时,介损角测量误差会随信号初相角而变化。表 4 给出了电压初相角变

表 4 初相角变化对介损角测量的影响

Tab.4 Influence of initial phase angle on dielectric loss angle measurement

初相角/rad	ANF 绝对 误差/rad	ANF 相对 误差/%
0	1.1356×10^{-7}	2.6872×10^{-3}
$\pi/4$	1.3467×10^{-7}	3.1867×10^{-3}
$\pi/2$	1.0033×10^{-7}	2.3741×10^{-3}
$3\pi/4$	1.5759×10^{-7}	3.7291×10^{-3}
π	3.7708×10^{-8}	8.9229×10^{-3}
$5\pi/4$	1.1823×10^{-7}	2.7977×10^{-3}
$3\pi/2$	1.9756×10^{-7}	4.6749×10^{-3}
$7\pi/4$	2.3171×10^{-7}	5.4830×10^{-3}

化时,采用本文算法得到的介损角的测量误差,设置基波频率在 50.2 Hz 左右波动时,算法通过 ANF 自动跟踪基波频率。可见初相角变化时,本文算法的测量绝对误差均在 10^{-7} rad 数量级,算法稳定性较高。

4.6 白噪声对介损角测量的影响

在电气量测量时,受电磁干扰等环境因素影响,不可避免地存在白噪声,白噪声严重时将淹没介损角的真实值。通过比较不同信噪比下介损角的测量误差,进一步论证算法的实用性,比较结果如表 5 所示。基于 ANF 的谐波分析法能有效抑制白噪声对介损角测量的干扰,当信噪比大于 60 dB 时,测量绝对误差保持或低于 10^{-5} rad 数量级,相较于加 Blackman-Harris 窗的谐波分析法^[14]减小了 1 个数量级。当信噪比大于 40 dB 时,相对误差小于 3.1%,可见此时算法仍具有较高的计算精度。

表 5 白噪声对介损角测量的影响
Tab.5 Influence of white noise on dielectric loss angle measurement

信噪比/dB	Blackman-Harris 标准差	ANF 绝对 误差/rad	ANF 相对 误差/%
20	2.49×10^{-2}	4.9548×10^{-4}	11.7246
40	3.17×10^{-3}	1.2715×10^{-4}	3.0088
60	3.71×10^{-4}	1.4089×10^{-5}	3.3339×10^{-1}
80	4.42×10^{-5}	1.2245×10^{-5}	2.8975×10^{-1}
100	3.70×10^{-5}	6.1437×10^{-6}	1.4538×10^{-1}

5 结论

经过仿真校验,本文所述方法的测量精确度较于以往的一些研究有所改进,仿真结果表明 ANF 能有效滤除电压、电流波形中的谐波和噪声分量,准确实现基波分量的跟踪及基波频率的提取,为改进传统谐波分析法测量介损角提供了有效的途径;结合 ANF 的谐波分析法在抑制频率波动、谐波干扰、噪声干扰等方面取得了明显的效果,在测量精度上较于以往的一些方法提高了 1~2 个数量级。

参考文献:

[1] 黄新红,廖瑞金,胡雪松,等. “综合相对测量法”于介质损耗在线检测中的应用[J]. 高压电器,2001,37(6):1-3.
HUANG Xinhong,LIAO Ruijin,HU Xuesong,et al. Application of the synthetic relative measuring method in on-line monitoring of dielectric loss factor[J]. High Voltage Apparatus,2001,37(6):1-3.

[2] 严学文. 基于改进谐波分析法的介损数字测量[J]. 电网技术,2009,33(19):195-198.
YAN Xuwen. Digital dielectric loss measurement based on improved harmonic analysis method[J]. Power System Technology, 2009,33(19):195-198.

[3] 杨晓东,唐超. 改进的数字量化测量方法在介损测量中的应用[J]. 重庆工学院院报:自然科学版,2007,21(5):47-50.
YANG Xiaodong,TANG Chao. Application of improved harmonic analysis method in measuring dielectric loss of capacitive

equipment[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science Edition,2007,21(5):47-50.

[4] 赵秀山,谈克雄,朱德恒,等. 介质损耗角的数字化测量[J]. 清华大学学报:自然科学版,1996,36(9):51-56.
ZHAO Xiushan,TAN Kexiong,ZHU Deheng,et al. Study on digital measurements for dielectric loss angle[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1996,36(9):51-56.

[5] 戴征武. 高压容性设备绝缘在线监测系统的设计与实现[D]. 杭州:浙江工业大学,2010.
DAI Zhengwu. Study and design of online insulation monitoring system for HV capacitive equipment[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2010.

[6] 沈显庆. 容性设备介质损耗角的分布式在线监测关键技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2010.
SHEN Xianqing. Research on key techniques for distributed on-line monitoring of dielectric loss angle of capacitive equipment [D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2010.

[7] 尚勇,杨敏中,王晓蓉,等. 谐波分析法介质损耗因数测量的误差分析[J]. 电工技术学报,2002,17(3):67-71.
SHANG Yong,YANG Minzhong,WANG Xiaorong,et al. Error analysis for the dielectric loss factor measurement based on harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2002,17(3):67-71.

[8] 孙和义,浦昭邦,聂鹏. 容性设备介质损耗角在线监测中的干扰抑制新方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):67-70.
SUN Heyi,PU Zhaobang,NIE Peng. A new interference reduction method in dielectric loss tangent on-line monitoring for capacitive equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(3):67-70.

[9] 任旭虎,马帅,赵仁德,等. 基于自适应陷波滤波器的基波与谐波有功功率分别计量[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):66-70.
REN Xuhu,MA Shuai,ZHAO Rende,et al. ANF-based fundamental-frequency and harmonic active power respective measurement[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(16):66-70.

[10] MOJIRI M,KARIMI-GHARTEMANI M. Estimation of power system frequency using an adaptive notch filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2007,56(6):2470-2477.

[11] MOJIRI M,KARIMI-GHARTEMANI M,BAKHSHAI A. Time-domain signal analysis using adaptive notch filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2007,55(1):85-93.

[12] MOJIRI M,BAKHSHAI A R. An adaptive notch filter for frequency estimation of a periodic signal[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2004,49(2):314-318.

[13] 温和,滕召胜,曾博,等. 基于三角自卷积窗的介损角测量算法及应用[J]. 电工技术学报,2010,25(7):192-198.
WEN He,TENG Zhaosheng,ZENG Bo,et al. Dielectric loss angle measurement algorithm and application based on triangular self-convolution window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(7):192-198.

[14] 徐志钊,律方成,李和明. 加 Blackman-Harris 窗插值算法仿真介损角测量[J]. 高电压技术,2007,33(3):104-108.
XU Zhiniu,LÜ Fangcheng,LI Heming. Simulation analysis of dielectric loss angle measured by the Blackman-Harris window interpolation algorithm[J]. High Voltage Engineering,2007,33

- (3):104-108.
- [15] 柴旭峥,关根志,文习山,等. $\tan \delta$ 高准确度测量的加权插值FFT算法[J]. 高电压技术,2003,29(2):32-33.
CHAI Xuzheng, GUAN Genzhi, WEN Xishan, et al. The Hanning-windowed interpolated algorithm for dielectric loss measurement with high accuracy[J]. High Voltage Engineering, 2003,29(2):32-33.
- [16] 龙锋,王富荣,李大进,等. 容性设备介质损耗因数在线监测方法及误差分析研究[J]. 电力科学与工程,2004(2):19-21.
LONG Feng, WANG Furong, LI Dajin, et al. Research on on-line monitoring of dielectric loss of high voltage capacitive apparatus and error analysis[J]. Electric Power Science and Engineering, 2004(2):19-21.
- [17] 徐志钊,律方成,姚辉,等. 改进基波相位分离法在介损角测量中的应用[J]. 高电压技术,2007,33(5):29-49.
XU Zhiniu, LÜ Fangcheng, YAO Hui, et al. Application of modified fundamental harmonic separation algorithm in dielectric loss angle measurement[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5):29-49.
- [18] 李泽文,曾祥君,覃丹,等. 基于FPGA的容性设备介质损耗在线测量系统[J]. 电力系统自动化,2006,30(12):92-96.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, TAN Dan, et al. On-line measurement system of dielectric loss tangent with FPGA for high voltage capacitive apparatus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(12):92-96.
- [19] 温和,滕召胜,王永,等. 频谱泄露抑制与改进介损角测量算法研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):2087-2094.
WEN He, TENG Zhaosheng, WANG Yong, et al. Study on spectral leakage suppression and improved dielectric loss angle measurement method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(9):2087-2094.
- [20] 李天云,范夕庆,汪剑波,等. 基于小波滤波和跟踪微分器的介质损耗因数检测方法[J]. 电网技术,2011,35(4):223-226.
LI Tianyun, FAN Xiqing, WANG Jianbo, et al. A method to detect dielectric loss factor based on wavelet filtering and tracking differentiator[J]. Power System Technology, 2011,35(4):223-226.

作者简介:

李功新(1964-),男,福建福州人,高级工程师,副教授,硕士研究生导师,博士研究生,主要从事电力系统自动化、电力设备在线监测、设备绝缘诊断等方面的研究工作;

黄彦婕(1986-),女,福建漳州人,硕士,研究方向为人工智能在电力系统中的应用、电力变压器油纸绝缘老化诊断(E-mail:570696850@qq.com);

江修波(1960-),男,福建福州人,教授,主要从事电力系统运行、电气设备检测以及电力变压器绝缘老化测试方面的研究工作。

Harmonic analysis based on ANF

LI Gongxin^{1,2,3}, HUANG Yanjie⁴, JIANG Xiubo²

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350000, China;

4. Xiamen Electric Power Company, Fujian Electric Power Company Limited, Xiamen 361000, China)

Abstract: A harmonic analysis method based on ANF(Adaptive Notch Filter) is proposed to improve the interference suppression of dielectric loss angle measurement. ANF can effectively filter out the integer harmonics, inter-harmonics and noise contained in the voltage/current waveform, track the fundamental component and accurately extract the fundamental frequency, with which, the dielectric loss angle is calculated by harmonic analysis method. Simulative result indicates that, the method of harmonic analysis based on ANF has higher measurement precision in the conditions of frequency fluctuation, harmonic component variation, white noise, dielectric loss angle variation, initial phase angel variation and so on.

Key words: capacitive apparatus; dielectric loss angle; ANF; harmonic analysis; electric filters; computer simulation