

DOI: 10.7667/PSPC170632

基于加窗傅里叶变换的弱电网阻抗测量算法

袁小平, 胡秀娟, 孙英洲, 武中文, 陆鹏飞

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了解决基于传统傅里叶变换的弱电网阻抗测量在电网背景谐波干扰和基频偏移时出现严重的检测误差现象, 给出了一种改进的检测算法。通过深入分析傅里叶变换以及窗函数的数学特点得出, 对信号的非同步采样及传统傅里叶变换较慢的频响曲线衰减速度是引起误差的主要原因。基于此提出采用加窗傅里叶变换算法, 以大大提高傅里叶变换主瓣与旁瓣以及旁瓣间的衰减速度, 同时适当增加傅里叶变换的频率分辨率以避免加窗之后主瓣过宽引起的主瓣干扰。Matlab 仿真和实验结果表明, 所提改进算法可有效提高电网阻抗检测的计算精度和抗干扰能力。
关键词: 弱电网; 阻抗测量; 频谱泄漏; 电网谐波; 加窗傅里叶

A weak grid impedance detection method based on windowed Fourier transformation

YUAN Xiaoping, HU Xiujuan, SUN Yingzhou, WU Zhongwen, LU Pengfei

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the error of the weak grid impedance measurement based on the traditional Fourier transform, which is caused by the grid background harmonic interference and the fundamental frequency fluctuation, an improved detection method is proposed. By analyzing the mathematical characteristics of Fourier transform and window function, it is concluded that the slow frequency response attenuation speed of the traditional Fourier transform and signals' asynchronous sampling is the main cause of the error. On this basis, a windowed Fourier transform algorithm is applied to greatly improve the Fourier transform attenuation speed from the main lobe to side lobe as well as from side lobe to side lobe. At the same time, the frequency resolution of Fourier transform is increased to avoid the main lobe interference caused by wide main lobe after windowing. Matlab simulation and experimental results verify that the method proposed is effective to improve calculation precision and anti-interference ability of grid impedance detection.

This work is supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20130205).

Key words: weak grid; impedance detection; spectrum leakage; power grid harmonic; windowed Fourier

0 引言

弱电网下电网阻抗不可忽略且具有时变性。研究表明电网阻抗增大, 特别是感性分量的增大会严重降低并网逆变器系统的相位裕度和幅值裕度, 恶化并网逆变器性能, 激起大量并网谐波, 使电能质量严重下降甚至使逆变器系统失去稳定^[1-3]。同时, 电网阻抗测量在其他故障保护等应用中也有重要意义^[4-6]。

从国内外相关文献来看, 电网阻抗在线测量方法主要分为主动法和被动法^[1-3]。其中以离散傅立叶变换为核心算法^[7-10]的阻抗在线检测原理简单易行,

运用最为广泛。但传统傅里叶变换算法在电网正常运行时, 易受电网频率波动以及电网背景谐波作用引起的频谱泄漏干扰, 将严重影响电网阻抗的计算精度。国内外相关学者主要研究了各种阻抗测量方法, 针对傅里叶自身缺陷问题却很少提及^[11-15]。

本文以单频注入法的主动测量法为例, 在深入研究傅里叶变换计算误差产生机理的前提下, 结合电网电压、电流信号的特点, 有针对性地提出改进措施, 采用加窗傅里叶变换分析法大大提高傅里叶变换主瓣与旁瓣以及旁瓣间的衰减速度, 适当提高傅里叶变换的频率分辨率避免加窗之后主瓣过宽引起的主瓣干扰。Matlab 仿真和实验结果验证了所提改进算法可有效提高电网阻抗检测的计算精度和抗干扰能力。

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20130205)

1 原理分析

1.1 阻抗检测原理

弱电网可等效为电网阻抗 Z_g 与理想电网电压源 U_g 的串联。基于单相并网逆变器的弱电网阻抗检测系统等效模型如图 1 所示。其中 U_{dc} 为逆变器直流母线侧电压。

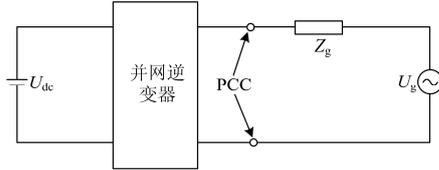


图 1 电网阻抗测量系统模型

Fig. 1 Grid impedance measurement system model

弱电网阻抗在线测量多采用主动法, 包括单频率注入法、双频率注入法与宽频率注入法, 利用并网逆变器向电网中注入小信号谐波信号, 然后同时采样 PCC 点的电网电压和并网电流, 最后以傅里叶变换为核心算法对采样数据进行分析, 计算出电网阻抗^[3,7-8]。其中单频注入法的计算原理如式(1)所示。式中, A_u 、 A_i 、 ψ_u 、 ψ_i 分别为经傅里叶变换提取出的注入特征电流及其电压响应信号的幅值和相位。 R_g 、 L_g 分别为电网阻抗的阻性成分和感性成分。

$$\begin{cases} I(h) = A_i \angle \psi_i, U(h) = A_u \angle \psi_u \\ Z_g = A_u / A_i \\ R_g = Z \cos(\psi_u - \psi_i) \\ L_g = Z \sin(\psi_u - \psi_i) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 传统傅里叶变换分析法

傅里叶变换是应用最为广泛的频域分析方法, 但由于其数学理论存在许多缺陷, 当信号为非同步采样或非整数周期截断时都会引入频谱泄漏, 造成分析误差。考虑电网电压背景谐波特点, 在采样频率 2 kHz 下分别采样 80 个点作离散傅里叶变换, 提取 200 Hz 谐波信号的归一化幅频谱图如图 2 所示。

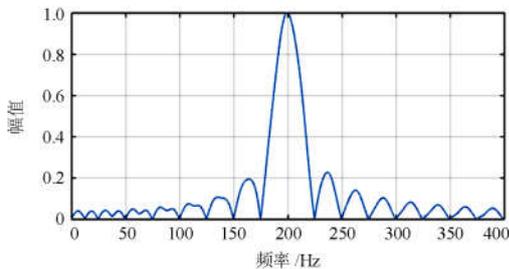


图 2 分辨率为 25 Hz 的归一化幅频谱

Fig. 2 Normalized amplitude frequency spectrum under the resolution of 25 Hz

根据式(2)可得, 此时傅里叶变换的频率分辨率为 25 Hz。从图 2 可以看出, 傅里叶算法的幅频曲线呈现出中间主瓣和两边一系列不断衰减旁瓣的特点, 主瓣的中心频率在 200 Hz 处的幅值响应为 1, 但除 200 Hz 以外的信号也不同程度地泄漏了部分频谱到 200 Hz 信号当中。因此, 电网的背景谐波将干扰特征信号的提取。由于所采用的频率分辨率正好能被电网基频和谐波频率整除, 傅里叶算法在电网基频和各次谐波频率处的幅值响应为零, 从而避免电压电流绝大多数频率成分信号对 200 Hz 信号形成干扰。但当电网基频变化时会导致其各次谐波频率也相应地发生改变, 此时电网基频及其各次谐波频率不再能被选定的频率分辨率整除, 因而产生更大的频谱泄漏, 造成更大的计算误差。表 1 为当电网基频分别为 49.5 Hz 和 50.5 Hz 时由电网基频和各次谐波造成的干扰情况(表中干扰比例为将所有频率幅值归一化后测到的对 200 Hz 处的泄漏百分比)。

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} \quad (2)$$

表 1 电网频率变化对 200 Hz 信号的干扰量

Table 1 Effect of grid frequency changes on 200 Hz

signal detection			
电网基频49.5 Hz		电网基频50.5 Hz	
频率/Hz	干扰百分比	频率/Hz	干扰百分比
基频(49.5)	0.535 6	基频(50.5)	1.082 1
3 次谐波(148.5)	2.193 4	3 次谐波(151.5)	4.719 2
5 次谐波(147.5)	4.106 4	5 次谐波(252.5)	4.832 1
7 次谐波(346.5)	2.252 2	7 次谐波(353.5)	1.733 4

从表 1 可以看出, 当电网频率变化时电网基频和各次谐波成分将会对 200 Hz 信号提取产生干扰。由于往 PCC 注入特征电流的幅值及其在电网阻抗上的电压响应信号幅值都很小, 而电网基频和各次谐波成分幅值较大, 因此当这种干扰发生时将极大地降低信号的信噪比, 从而大大增加电网阻抗的计算误差。

1.3 高精度傅里叶变换算法的设计

1.3.1 提高频率分辨率的傅里叶算法精度分析

仍设置采样频率为 2 kHz 并分别采样 400 点和 80 点作傅里叶变换, 此时傅里叶对应的频率分辨率分别为 5 Hz、25 Hz, 其幅频曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 不同频率分辨率下各主瓣相对于第一旁瓣以及旁瓣之间衰减速度一样, 此时傅里叶频率分辨率越高旁瓣就越密集, 衰减速度就越快。因此可认为傅里叶频率分辨率越高其幅频曲线衰减速度也就越快, 由其他频率产生的频谱间干扰也就越小。

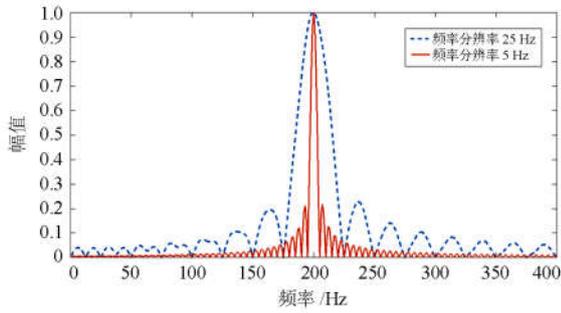


图 3 分辨率为 25 Hz 和 5 Hz 条件下傅里叶变换的幅频特性
Fig. 3 Frequency/amplitude characteristics of the Fourier transform under the resolution of 25 Hz and 5 Hz

特别地，当信号没有发生截断($N = \infty$)时，可得到一根理想的不含任何谱间干扰的单一谱线。因此提高傅里叶的频率分辨率可有效地提高电网阻抗的计算精度。

设采样频率和采样时间分别为 F_s 、 T_c ，由式(2)可得频率分辨率与采样时间有如式(3)所示关系，即频率分辨率与采样时间成反比而与采样频率无关，因此提高频率分辨率就需要增加采样时间。在不发生频谱混叠的条件下，适当降低采样频率可以减小傅里叶分析点数从而降低计算复杂度。

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} = \frac{F_s}{T_c F_s} = \frac{1}{T_c} \quad (3)$$

虽然提高频率分辨率可以加快傅里叶算法的幅频曲线衰减特性，抑制电网频率变化时引入的频谱间干扰，但并没有改变傅里叶算法主瓣与第一旁瓣以及旁瓣之间的衰减速度，要取得很高的衰减效果单靠增加特征电流信号注入时间会增加并网电流的 THD 值。

1.3.2 采用窗函数的傅里叶算法精度分析

(1) 窗函数分析

正如前面分析，对信号的截断是造成傅里叶频谱泄漏的根本原因，对一个无穷长信号的截断可以在数学上描述为这个信号与一个有限宽度的窗函数相乘。根据傅里叶变换的性质可知，原始信号与窗函数在时域内相乘相当于原始信号的频谱与该窗函数频谱在频域内卷积，因此窗函数的频谱特性对傅里叶分析精度有重要的影响。传统的傅里叶分析将采样得到的信号不加处理直接进行变换，相当于采用幅值为 1 的矩形窗函数对信号进行了截断处理。衡量一个窗函数的性能主要有最小衰减倍数和主瓣宽度两个指标，表 2 列出了几种常见窗函数的性能。

窗函数的最小衰减倍数越大则信号的幅值分辨率就越高，主瓣宽度越大则信号的频率分辨率越

差。从表 2 可以看出，不管采用何种窗函数总呈现出最小衰减倍数越大则主瓣宽度就越宽，即傅里叶变换的幅值分辨率与频率分辨率是相互制约的。在频域分辨率不变的情况下过宽的主瓣会导致主瓣能量往两侧发生泄漏，此时如有需要检测的信号频谱正处在主瓣范围内将产生严重的计算误差。

表 2 几种常见窗函数的性能

窗函数名称	主瓣宽度/(π/N)	最小衰减倍数/dB
矩形窗	1.8	-21
汉宁窗	6.2	-44
汉明窗	6.6	-51
布莱克曼窗	11	-74

(2) 加窗傅里叶变换分析

采样频率为 2 kHz、分辨率为 25 Hz 条件下分别加矩形窗和加布莱克曼窗时，三次谐波 150 Hz 对 200 Hz 信号频谱干扰示意图如图 4 所示。从图 4 中可以看出，加布莱克曼窗之后傅里叶变换的频谱衰减速度明显快于矩形窗，往两侧经过大约 75 Hz (3 倍频率分辨率)的衰减几乎减小为零。但由于其主瓣宽度过宽覆盖到了 200 Hz 有用信号的频谱导致在 200 Hz 处发生了 0.101 2 的泄漏，而矩形窗由于主瓣较窄没有发生主瓣干扰。

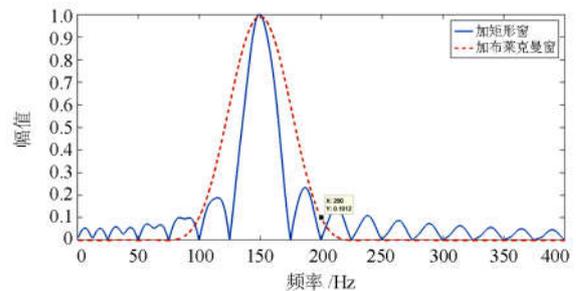


图 4 150 Hz 信号对 200 Hz 信号频谱干扰示意图
Fig. 4 Schematic of spectrum interference caused by 150 Hz signal to 200 Hz signal

1.3.3 高精度的傅里叶变换算法

通过上述分析可知，加窗傅里叶变换可以明显加快傅里叶主瓣与第一旁瓣以及旁瓣之间的衰减速度，但其主瓣过宽需要适当地增加频率分辨率才能避免主瓣过宽引起的主瓣干扰。选择采样频率为 2 kHz、分辨率为 10 Hz，在布莱克曼窗截断信号条件下作傅里叶变换。同等条件下对比不加窗时对 200 Hz 检测算法的幅频响应曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出，加窗之后的傅里叶变换从中心频率 200 Hz 处往两边经过大约三个频率分辨率的过渡后衰减为零。在谐波频率 150 Hz 和 250 Hz 处幅值响应为零，

算法很好地消除了电网基频变化时由基频和各次谐波成分对 200 Hz 信号检测的干扰。相比之下, 不加窗傅里叶变换仍然有很多旁瓣的存在, 从而不可避免地会受到干扰, 经改进后的电网阻抗检测算法效果令人满意。

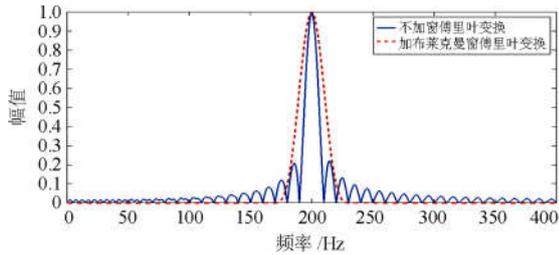


图 5 不加窗与加布莱克曼窗傅里叶变换幅频响应曲线
Fig. 5 Frequency response of traditional Fourier transform and Fourier transform with Blackman-window

2 仿真与分析

为了验证所提出算法的有效性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了电网阻抗测量仿真模型。令额定条件下并网逆变器电压电流主要包含奇次谐波电流 THD 值为 2%。在采样频率为 2 kHz 下采样 200 个点, 注入谐波信号为 200 Hz、有效值 1 A 的谐波电流, 对比传统傅里叶变换(测试数据 1)和改进的算法(测试数据 2)检测电网阻抗的有效性和抗干扰性。

2.1 理想条件下电网阻抗检测算法误差分析

理想情况下电网电压不含谐波且频率为 50 Hz, 在此条件下测试不同电网阻抗条件下两种算法的精度, 测试结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 理想条件下两种算法误差都在 10% 以内, 算法 2 在精度上优于算法 1, 且随着电网阻抗的增加测量精度都有所提高。

表 3 理想条件下电网阻抗测试值

类别	1	2	3	4
R_g 实际值/ Ω	0.50	1.00	1.50	2.00
R_g 测试值 1/ Ω	0.56	1.09	1.57	2.07
R_g 测试值 2/ Ω	0.54	1.05	1.55	2.03
R_g 测量误差 1/%	12.48	9.58	4.99	3.77
R_g 测量误差 2/%	8.34	4.60	3.27	1.63
L_g 实际值/mH	0.50	1.00	1.50	2.00
L_g 测试值 1/mH	0.45	0.94	1.39	1.92
L_g 测试值 2/mH	0.46	1.01	1.45	1.97
L_g 测量误差 1/%	10.84	6.17	7.45	3.84
L_g 测量误差 2/%	9.48	0.72	3.62	1.33

2.2 电网电压谐波对电网阻抗检测算法的影响

为了测试电网电压背景谐波对电网阻抗检测

算法的干扰, 仿真过程中在电网电压上叠加 5% 的三次谐波和 1.61% 的五次谐波, 电网阻抗检测结果如表 4 所示。对比表 3 可以看出, 电压谐波干扰下注入特征信号附近谐波频谱部分泄漏到注入信号当中, 从而检测精度有所降低。但相比不加窗傅里叶变换, 采用加窗处理增大了对附近干扰频谱的抑制, 电网阻抗检测效果明显优于普通傅里叶变换。

表 4 电网电压包含谐波条件下电网阻抗测试值

类别	1	2	3	4
R_g 实际值/ Ω	0.50	1.00	1.50	2.00
R_g 测试值 1/ Ω	0.61	1.15	1.60	2.08
R_g 测试值 2/ Ω	0.56	1.08	1.58	2.04
R_g 测量误差 1/%	22.03	15.21	6.68	4.87
R_g 测量误差 2/%	12.43	11.43	5.46	2.08
L_g 实际值/mH	0.50	1.00	1.50	2.00
L_g 测试值 1/mH	0.43	0.91	1.38	1.90
L_g 测试值 2/mH	0.45	1.06	1.44	1.96
L_g 测量误差 1/%	13.87	9.13	8.14	5.22
L_g 测量误差 2/%	10.01	6.57	4.27	2.82

2.3 电网基频偏移对电网阻抗检测的影响

实际条件下电网频率存在小范围的波动, 为了测试电网基频改变对电网阻抗的影响, 在电网包含谐波基础上使基频往上变化 0.5 Hz, 测试结果如表 5 所示。对比表 4 可以看出, 电网电压包含谐波且发生基频偏移条件下, 采用传统傅里叶变换的检测值出现严重误差, 而采用加窗傅里叶变换检测误差没有明显变化。这是由于这种条件下电网基波和各次谐波频点全部发生偏移, 基频和各次谐波频点不再能被傅里叶分辨率整除, 此时注入信号附近谐波将对注入信号产生严重的频谱泄漏, 当谐波含量较大时其泄漏值将完全淹没注入信号。

表 5 电网基频变化条件下电网阻抗测试值

类别	1	2	3	4
R_g 实际值/ Ω	0.50	1.00	1.50	2.00
R_g 测试值 1/ Ω	0.60	0.25	0.33	0.85
R_g 测试值 2/ Ω	0.52	0.93	1.45	1.94
R_g 测量误差 1/%	219.70	124.99	78.17	57.50
R_g 测量误差 2/%	3.3	6.98	3.49	2.78
L_g 实际值/mH	0.50	1.00	1.50	2.00
L_g 测试值 1/mH	0.01	0.56	0.99	1.57
L_g 测试值 2/mH	0.49	1.05	1.46	1.95
L_g 测量误差 1/%	97.78	43.74	34.35	21.38
L_g 测量误差 2/%	1.00	5.20	2.80	2.26

通过上述仿真实验对比可以看出,改进的算法在电网各种工况下都能实现电网阻抗的测量,与传统的傅里叶变换算法相比具有检测精度高、抗干扰性强的特点。

3 电网阻抗在线监测实验与结果

限于实验条件无法提供理想的电网电压(电网模拟器),故采用增量测试法,即在初始并网状态下投切一定阻抗模拟新增电网阻抗,然后测试该增量阻抗来评估电网阻抗测试算法的性能。在阻抗测量实验中投入标称值为 $1\Omega+2\text{ mH}$ 的阻抗模拟增加变化的电网阻抗,系统每隔20个工频周期(0.4 s)测量一次电网阻抗,在投入前后共测试50次电网阻抗值。传统傅里叶算法的电网阻抗检测算法和改进的新算法在阻抗投切前后计算结果如图6所示,测量平均值及测试误差如表6所示。

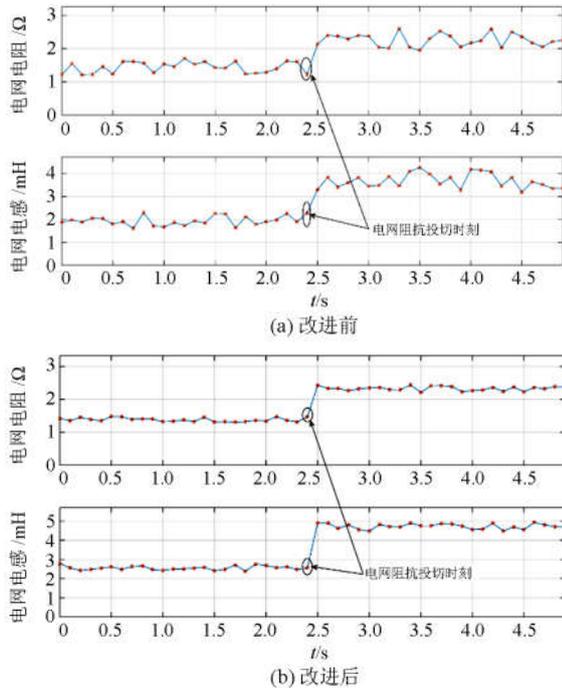


图6 改进傅里叶变换前后的电网阻抗检测

Fig. 6 Grid impedance detection based on traditional and improved Fourier transform

表6 电网阻抗检测算法改进前后测试结果及误差

Table 6 Grid impedance test value and error based on conventional and improved grid impedance detection algorithm

	R_g 增量测试值/ Ω	R_g 增量标称值/ Ω	测量误差/%	L_g 增量测试值/mH	L_g 增量标称值/mH	测量误差/%
改进前	0.812	1.00	18.8	1.740	2.00	13.0
改进后	0.95	1.00	5.0	2.174	2.00	-8.70

从图6中可以看出,在阻抗投切之前电网已经存在一定电网阻抗值,约为 $1.3\Omega+2.5\text{ mH}$ 。对比图6(a)和图6(b)可以看出,改进的新算法的测量波动要小于改进前测量算法的,在稳定性和抗干扰性上有较大的优势。

由于实验室没有电网模拟器不能模拟电网频率变化,故将原先采样频率由2 kHz(频率分辨率10 Hz)调整为2.02 kHz(频率分辨率10.1 Hz),新的频率分辨率不能被基频及其各次谐波频率整除,其效果与电网频率偏移类似。调整采样频率后两种算法的测试平均值及测试误差如表7所示,可以看出频率变化之后改进前算法误差迅速增大,而改进后的新算法误差只是略有增加,因此改进后的算法能有效抑制电网频率变化对电网阻抗测量所带来的影响。

表7 频率波动时阻抗检测算法改进前后测试结果及误差

Table 7 Grid impedance test value and error based on conventional and improved impedance detection algorithm under variable frequency condition

	R_g 增量测试值/ Ω	R_g 增量标称值/ Ω	测量误差/%	L_g 增量测试值/mH	L_g 增量标称值/mH	测量误差/%
改进前	0.152	1.00	84.8	1.211	2.00	39.5
改进后	0.911	1.00	9.9	2.282	2.00	-14.1

4 总结

傅里叶变换在电网阻抗测量中运用广泛,但在非同步采样或非整数周期截断时容易造成严重的频谱泄漏。本文针对弱电网采用传统傅里叶变换的阻抗算法容易造成较大测量误差现象,深入分析了傅里叶变换与窗函数的数学特点,并提出了改进算法。Matlab仿真与实验结果表明:改进算法采用加窗傅里叶变换大大提高了傅里叶变换的主瓣与旁瓣以及旁瓣间的衰减速度,提高傅里叶变换的频率分辨率避免了加窗之后主瓣过宽引起的主瓣干扰;改进算法提高了电网阻抗检测在电网谐波干扰和基频偏移时的计算精度和抗干扰能力。

参考文献

[1] CESPEDES M, SUN J. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 516-523.
 [2] 周林, 张密, 居秀丽, 等. 电网阻抗对大型并网光伏系统稳定性影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 34-41.

- ZHOU Lin, ZHANG Mi, JU Xiuli, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic plants due to grid impedances[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 34-41.
- [3] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 320-326.
- XIE Shaojun, JI Lin, XU Jinming. Review of grid impedance estimation for grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326.
- [4] 侯李祥, 卓放, 师洪涛, 等. 基于系统稳定性分析的微电网阻抗测量技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 153-162.
- HOU Lixiang, ZHUO Fang, SHI Hongtao, et al. New techniques for measuring impedance characteristics of an islanded microgrid based on stability analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 153-162.
- [5] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Impedance-based analysis of active frequency drift islanding detection for grid-tied inverter system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 332-341.
- [6] 徐云鹏, 叶豪东, 和敬涵, 等. 带整流性负载的分布式发电系统孤岛检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 33-39.
- XU Yunkun, YIP T, HE Jinghan, et al. Study of islanding detection of distributed generation system with rectifier load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 33-39.
- [7] 刘桂花, 马田源, 石桐, 等. 双谐波注入的弱电网阻抗在线检测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 132-139.
- LIU Guihua, MA Tianyuan, SHI Tong, et al. On line detection of weak grid impedance with dual harmonic current injection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 132-139.
- [8] ROINILA T, VILKKO M, SUN J. Broadband methods for online grid impedance measurement[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, september 15-19, 2013, Denver, USA: 3003-3010.
- [9] 吴学智, 梁建钢, 童亦斌, 等. 基于复数滤波器和非特征次谐波注入的电网阻抗估算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2796-2801.
- WU Xuezhi, LIANG Jiangang, TONG Yibin, et al. Research on method of grid impedance estimation by complex filters based initiative harmonic injection[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2796-2801.
- [10] CÉSPÉDES M, SUN J. Online grid impedance identification for adaptive control of grid-connected inverters[C] // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-20, 2012, Raleigh, USA: 914-921.
- [11] 黄建明, 李晓明. 结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 43-50.
- HUANG Jianming, LI Xiaoming. Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 43-50.
- [12] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-145.
- ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-145.
- [13] HOFFMANN N, FUCHS F W. Minimal invasive equivalent grid impedance estimation in inductive-resistive power networks using extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 631-641.
- [14] YANG J, LI W, CHEN T, et al. Online estimation and application of power grid impedance matrices based on synchronised phasor measurements[J]. Generation Transmission & Distribution IET, 2010, 4(9): 1052-1059.
- [15] 吕洋, 徐政. 投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1780-1784.
- LÜ Yang, XU Zheng. Network harmonic impedance measurement using capacitor switching[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1780-1784.

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-07-12

作者简介:

袁小平(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理、电路与系统、煤矿安全监测等; E-mail: 1571021252@163.com

胡秀娟(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网。E-mail: 753202338@qq.com

(编辑 魏小丽)