

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314794

基于广义S变换的光伏电站谐波和间谐波分析方法*

宋强¹ 张欣² 杨路¹ 党三磊¹ 张鼎衡¹ 黄智坤¹

(1. 广东电网有限责任公司计量中心 清远 511699; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要: 针对S变换高斯窗函数形式固定不变的问题,引入高斯窗调节因子改进S变换,提出一种基于广义S变换的光伏电站谐波和间谐波分析方法。首先通过MATLAB/Simulink搭建光伏电站的仿真模型,在自然采样双极性SPWM调制方式下采集逆变器的三相输出电压;然后以A相电压为例,采用广义S变换对电压信号处理得到一个模时频矩阵;最后对该矩阵分析实现光伏电站谐波和间谐波参数的准确计算。仿真结果表明,本文方法的幅值计算误差最大仅为 $3.30 \times 10^{-4} \%$,频率的平均计算误差为0%,远小于S变换幅值误差35.19%和频率误差2.39%;能满足光伏电站谐波和间谐波检测精度的需要。

关键词: 光伏电站;谐波分析;间谐波分析;广义S变换

中图分类号: TM933 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Harmonic and interharmonic analysis method for photovoltaic power station based on generalized S transform

Song Qiang¹ Zhang Xin² Yang Lu¹ Dang Sanlei¹ Zhang Dingqu¹ Huang Zhikun¹(1. Metrology Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Qingyuan 511699, China;
2. National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the problem of fixed Gaussian window function in the S transform, a Gaussian window adjustment factor is introduced to improve the algorithm, and a harmonic and interharmonic analysis method for photovoltaic power station based on generalized S transform is proposed. Firstly, the simulation model of the photovoltaic power station is built by MATLAB/Simulink, and the three-phase output voltage of the inverter is collected under natural sampling bipolar SPWM modulation mode. Then, taking the A phase voltage as an example, the generalized S transform is used to process the voltage signal to obtain a modular time-frequency matrix. Finally, the harmonic and interharmonic parameters of the photovoltaic power station are accurately calculated, which is achieved by analyzing the matrix. Simulation results show that the maximum amplitude calculation error of the method is only $3.30 \times 10^{-4} \%$, the average calculation error of frequency is 0%, which is much smaller than the S transform amplitude error of 35.19% and frequency error of 2.39%. The need for detection accuracy of harmonics and interharmonics can be met in photovoltaic power station.

Keywords: photovoltaic power station; harmonic analysis; interharmonic analysis; generalized S transform

0 引言

“双碳”目标的提出,促进了风能和太阳能等清洁能源的规模化开发利用,光伏发电等高比例新能源并网成为新型电力系统发展的关键^[1]。光伏电站含有DC/AC变换器等电力电子装置,出力具有随机性和间歇性的特点,高频开关动作都将导致产生复杂、大量的谐波和间谐波问题^[2]。由于间谐波频率检测困难以及非平稳特性,使难以实现对

其准确分析^[3-4]。谐波、间谐波导致设备损耗增加,电能计量精度降低。因此,光伏电站谐波、间谐波的准确分析对保障系统的安全、经济运行和谐波治理具有重要意义。

针对电网谐波、间谐波分析,国内外学者进行了大量研究,提出了许多分析方法,但对于光伏电站谐波、间谐波分析研究尚处于起步阶段。目前常用的谐波、间谐波分析方法包括快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)^[5-6]、小波变换(wavelet transform, WT)^[7-8]、经验模态分解

收稿日期:2023-10-19

* 基金项目:南方电网公司科技项目(035900KK52220007)资助

环矢量控制能较好地平稳 U_{dc} 时, ω_s 主要影响输出的谐波次数, m_s 主要影响输出的谐波幅值。因此,在光照条件发生变化、MPPT 控制跟踪最大功率点时,其输出的调制波幅值也将随之改变, m_s 变化进一步使逆变器的谐波幅值发生改变。

2 基于广义 S 变换的光伏电站谐波和间谐波分析

2.1 广义 S 变换

S 变换算法使用高斯窗函数,克服了短时傅里叶变换方法时频分辨率固定的缺陷,而且也避免了 WT 方法小波基选择困难的局限性。假设用于谐波、间谐波分析的信号为 $x(t)$, S 变换的表达式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(\tau - t, f)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

$$g(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (6)$$

其中, τ 为控制参数; f 为频率; $g(\tau - t, f)$ 为高斯窗函数; t 为时间。

由于 S 变换的 $g(\tau - t, f)$ 形式固定不变,不能够根据光伏电站中在自然采样双极性 SPWM 调制方式下测量采集逆变器的电压信号进行调整,因而在分析光伏电站频率随机、间隔较小的谐波和间谐波时,该方法的准确性和实用性等受到较大限制。在非平稳信号分析过程中,不同频率成分时频分布状况不同,为获得更高的时频分辨率,改进 S 变换算法,引入高斯窗调节因子,利用广义 S 变换以实现光伏电站谐波和间谐波的准确检测。

同样假设用于谐波、间谐波分析的信号为 $x(t)$, 广义 S 变换的表达式为:

$$GS(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(\tau - t, f)e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

$$g(\tau - t, f) = \frac{\lambda |f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\lambda^2 f^2 (\tau-t)^2}{2}} \quad (8)$$

式中: λ 为高斯窗调节因子。

在实际应用的过程中,从光伏电站中逆变器获取的电压信号是离散的。因而,需要将上述广义 S 变换算法进行离散化处理,才能够满足光伏电站谐波和间谐波分析的要求。离散形式的广义 S 变换表达式为:

$$\begin{cases} GS[iT, \frac{k}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X(\frac{m+k}{NT}) e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{\lambda^2 k^2}} e^{\frac{j2\pi mi}{N}}, & k \neq 0 \\ GS[iT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(\frac{m}{NT}), & k = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: T 为信号采集间隔; N 为总采集点数; $i, k, m = 0, 1, \dots, N-1$ 。

离散广义 S 变换分析光伏电站采集的各相电压信号结果 $k = 0$ 和 $k \neq 0$ 分别进行求模,计算表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{B} = |GS[iT, \frac{k}{NT}]|, & k \neq 0 \\ \mathbf{B} = |GS[iT, 0]|, & k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

经以上分析可知,广义 S 变换的计算结果求模后可得到一个模时频矩阵 \mathbf{B} , 对该矩阵进行分析后,如分析 \mathbf{B} 的列,除了能够准确提取光伏电站的工频(50 Hz)分量,而且对于频率接近的谐波和间谐波分量也可以较好的辨识。

2.2 光伏电站谐波和间谐波分析步骤

采用本文所提的广义 S 变换提取光伏电站输出电压信号的谐波、间谐波分量,由于在 S 变换中引入高斯窗调节因子,因此可提高光伏电站谐波和间谐波分析的准确性。其总体流程图如图 2 所示,具体步骤为:

1) 通过 MATLAB/Simulink 搭建光伏电站的仿真模型,在自然采样双极性 SPWM 调制方式下获取光伏电站输出的三相电压信号;

2) 采用离散形式的广义 S 变换算法分析采集的 A 相电压信号,并对计算结果进行求模,由此得到一个模时频矩阵 \mathbf{B} ;

3) 在此基础上,通过对 \mathbf{B} 的列分析来绘制频谱图进行频谱分析,得到具体时刻对应的瞬时频率与瞬时幅值,即为工频和各谐波、间谐波分量的准确幅值和频率。

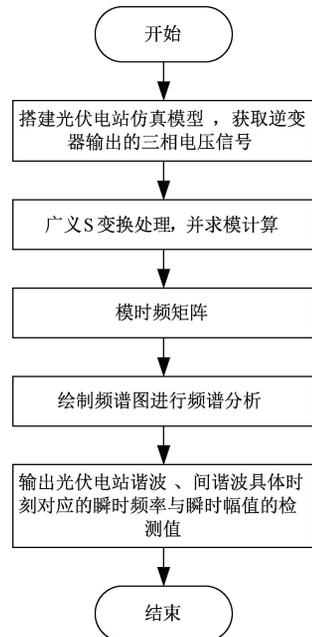


图 2 基于广义 S 变换的光伏电站谐波和间谐波分量提取流程图

3 算例分析

本文分别构建含不同谐波、间谐波分量的测试信号和光伏电站仿真模型输出电压信号,以验证采用离散形式的广义 S 变换检测谐波和间谐波的瞬时幅值、瞬时频率的准确性和可行性。

3.1 测试信号的仿真分析

为了验证本文采用广义 S 变换检测谐波和间谐波的正确性,利用 MATLAB R2019b 环境构建含有不同谐波、间谐波分量的测试信号,其仿真模型可以表示为:

$$f(t) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(2\pi f_m t) \quad (11)$$

式中: A_m 为测试信号各频率分量对应的幅值,单位为 V; f_m 为测试信号各频率分量对应的频率,单位为 Hz。工频分量: $A_1 = 100, f_1 = 50$; 间谐波分量: $A_2 = 20, f_2 = 15$, $A_3 = 16, f_3 = 105$; 谐波分量: $A_4 = 15, f_4 = 150, A_5 = 13, f_5 = 250, A_6 = 10, f_6 = 350$ 。此外,测试信号的采样频率为 10 kHz;采样时间为 1 s;其波形如图 3 所示。

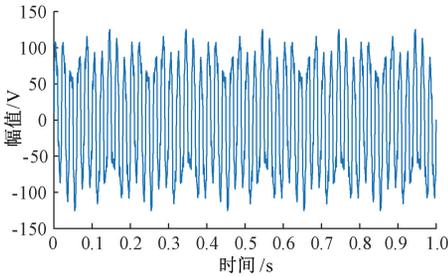


图 3 测试信号波形图

采用本文所提的广义 S 变换算法和传统的 S 变换算法分别对式(10)即图 3 所示的测试电压信号进行处理,求模获取对应的模时频矩阵 \mathbf{B} , 并对 \mathbf{B} 的列进行频谱分析,得到的频谱结果如图 4 和 5 所示。

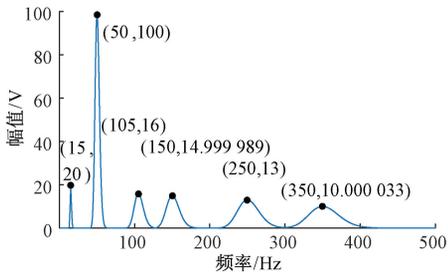


图 4 广义 S 变换频谱分析

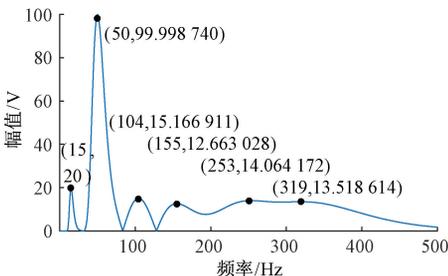


图 5 S 变换频谱分析

此外,表 1 和 2 分别具体给出了不同方法下测试电压信号各谐波、间谐波瞬时幅值和瞬时频率的检测结果。

表 1 不同方法下测试电压信号各次谐波、间谐波瞬时幅值检测结果

实际值/ V	广义 S 变换		S 变换	
	计算值/V	误差/%	计算值/V	误差/%
100	100	0	99.998 740	1.26×10^{-3}
20	20	0	20	0
16	16	0	15.166 911	5.21
15	14.999 989	7.33×10^{-5}	12.663 028	15.58
13	13	0	14.064 172	8.19
10	10.000 033	3.30×10^{-4}	13.518 614	35.19

表 2 不同方法下测试电压信号各次谐波、间谐波瞬时频率检测结果

实际值/ Hz	广义 S 变换		S 变换	
	计算值/Hz	误差/%	计算值/Hz	误差/%
50	50	0	50	0
15	15	0	15	0
105	105	0	104	0.95
150	150	0	155	3.33
250	250	0	253	1.20
350	350	0	319	8.86

由图 4、5 和表 1、2 可以看出,S 变换由于高斯窗函数形式固定不变,导致整体检测精度较低,而将 S 变换进行改进,所提的基于广义 S 变换能够较好地辨识测试电压信号的各谐波和间谐波分量,幅值的计算误差最大为 $3.30 \times 10^{-4} \%$,频率的计算误差均为 0%,实现了比 S 变换方法更高的准确性。

3.2 光伏电站输出信号的仿真分析

为了进一步验证本文采用广义 S 变换检测光伏电站谐波和间谐波的可行性,采用 MATLAB R2019b/Simulink 环境搭建光伏电站并网的仿真模型进行分析,其结构如图 6 所示。

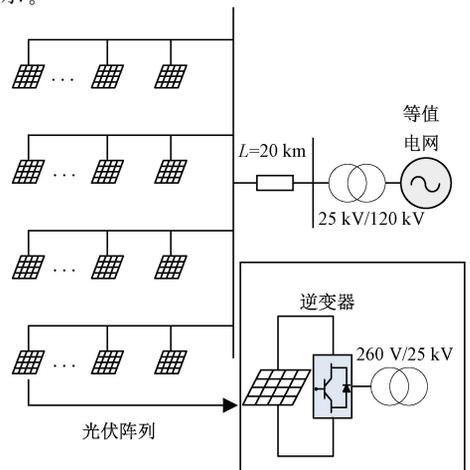


图 6 光伏电站并网的仿真结构

对图 6 所示的光伏电站并网仿真模型进行参数设置:光伏电站共有 4 条汇集线路,每条线路共连接 100 个 100 kW 的光伏阵列,光伏阵列通过三相两电平逆变器的双级式结构经 260 V/25 kV 变压器和 25 kV/120 kV 变压器升压后连接到高压电网。光伏电站采用常规 MPPT 控制策略,其额定光照为 500 W/m^2 ;SPWM 采用异步模式双极性自然采样策略,三相逆变器开关频率为 $27 \times 50 \text{ Hz}$;电网正常运行下额定电压为 120 kV,额定频率为 50 Hz。

当光照为 500 W/m^2 、开关频率为 1 350 Hz,在自然采样双极性 SPWM 调制方式下采集光伏电站逆变器的三相输出电压,A 相电压波形如图 7 所示。

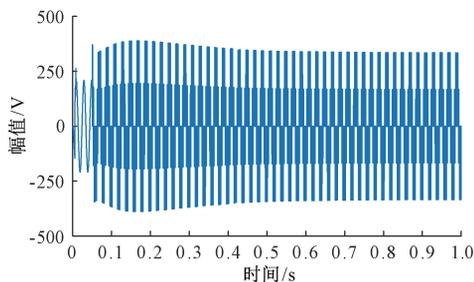


图 7 光伏电站输出电压信号

利用广义 S 变换对图 7 所示的光伏电站逆变器输出的 A 相电压信号进行处理,求模获取对应的模时频矩阵 B ,并对 B 的列进行频谱分析,得到的频谱结果如图 8 所示。

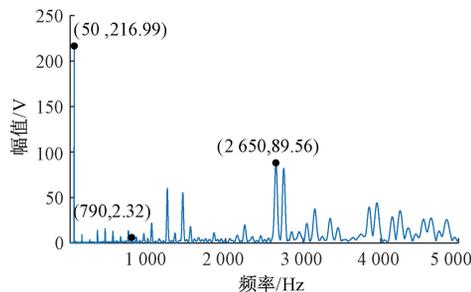


图 8 广义 S 变换光伏电站频谱分析

由图 8 可知,广义 S 变换后,能够提取光伏电站输出电压信号的工频、谐波和间谐波分量,谐波主要分布在整数倍开关频率附近。工频分量:检测频率为 50 Hz,检测幅值为 216.99 V;谐波分量:主要为 3、5、7、9 等奇次谐波,例如检测频率为 2 650 Hz,检测幅值为 89.56 V;间谐波分量:例如检测频率为 790 Hz,检测幅值为 2.32 V。因此,本文所提方法能够用于光伏电站的谐波和间谐波分析,具备一定的实用性和可行性。

4 结 论

针对光伏电站频率随机、间隔较小的谐波和间谐波信号检测不准确的问题,本文在 S 变换算法中引入了高斯窗调节因子,提出一种基于广义 S 变换的光伏电站谐波和间

谐波分析方法。采用 MATLAB/Simulink 搭建了光伏电站的仿真模型,在自然采样双极性 SPWM 调制方式下分析了光伏电站逆变器的谐波输出特性;利用广义 S 变换对电压信号处理得到一个模时频矩阵,从而实现了光伏电站谐波和间谐波的准确分析。不同工况下的仿真结果表明,本文所提方法可以有效区分光伏电站谐波和间谐波信号,并能准确计算具体时刻对应的瞬时幅值和瞬时频率参数,与 S 变换算法相比,均有更高的检测效果。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
- [2] 周念成,池源,王强钢,等.并网光伏电站在线监测与状态评估系统[J].电力自动化设备,2012,32(10):6-11.
- [3] GALLO D, LANDI C, LANGELLA R, et al. On the use of the flickermeter to limit low-frequency interharmonic voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1720-1727.
- [4] 孙名扬,王艳,顾叮咚,等.基于改进频谱叠加算法的多间谐波检测方法[J].电网与清洁能源,2022,38(3):1-7.
- [5] 翟晓军,周波.一种改进的插值 FFT 谐波分析算法[J].中国电机工程学报,2016,36(11):2952-2958.
- [6] 陈子珍,夏冰冰,阎威武.基于改进加窗插值 FFT 的高精度谐波与间谐波检测算法[J].中国电力,2015,48(9):73-79.
- [7] MORSI W G, EL-HAWARY M E. A new perspective for the IEEE Standard 1459-2000 via stationary wavelet transform in the presence of nonstationary power quality disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2356-2365.
- [8] PHAM V L, WONG K P. Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms [J]. IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 249-254.
- [9] 吕帅,张靠社.基于小波变换去噪预处理的 EMD 谐波检测方法[J].电网与清洁能源,2016,32(6):58-61.
- [10] 李月英,林家泉,李宗帅.基于频率约束的经验模态分解的谐波检测方法[J].电气传动,2015,45(8):72-76.
- [11] 季青川,刘鸣,毕伟,等.改进小波包与 EMD 的微电网谐波检测研究[J].电力电子技术,2020,54(12):89-92.
- [12] 张宇辉,贺健伟,李天云,等.基于数学形态学和 HHT 的谐波和间谐波检测方法[J].电网技术,2008,32(17):46-51.
- [13] 李正明,徐敏,潘天红,等.基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法[J].电力系统保护与控制

- 制, 2014, 42(4): 34-39.
- [14] 李天云, 程思勇, 杨梅. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 109-113.
- [15] 王宇, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 离散正交 S 变换在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 93-97.
- [16] 何智龙, 苏娟, 覃芳. S 变换在电能质量扰动中的分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(22): 25-30.
- [17] 唐求, 王耀南, 郭斯羽, 等. 基于 S 变换与 PNN 的电能质量多扰动检测[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1668-1673.
- [18] 曹立威, 吴胜华, 张承胜, 等. SPWM 谐波分析的一般方法[J]. 电力电子技术, 2002, 36(4): 62-65.

作者简介

宋强, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电能计量新技术研究。

张欣(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为交流阻抗及电能计量技术研究。

E-mail: zhxin@nim. ac. cn

杨路, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电能计量新技术研究。

党三磊, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为电能计量管理及新技术研究。

张鼎衢, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电能计量装置运行管理与技术应用研究。

黄智坤, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为电能计量新技术研究。