

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802316

## 基于谐波小波的风力发电并网电压故障信号特征检测

李晓晶<sup>1</sup> 陈新<sup>1</sup> 吴国栋<sup>1</sup> 王峰<sup>1</sup> 陈仕彬<sup>2</sup>

(1.国网甘肃省电力公司 兰州 730030; 2.国网甘肃省电力公司电力科学研究院 兰州 730050)

**摘要:** 针对风力发电并网对电网电能质量产生影响的问题,深入分析风力发电并网特点及故障特征,提出一种采用谐波小波降噪与时频联合分析相结合的风力发电并网电压故障信号特征提取方法,该方法解决了采用传统的傅里叶变换无法对非平稳电压故障测试信号进行分析处理的问题,充分利用谐波小波降噪技术对强噪声背景下的非平稳电压故障测试信号进行提纯降噪处理,再对降噪后的纯净信号进行时频联合分析,利用时频联合分析结果对风力发电并网电压故障进行精确定位,从而为故障穿越提供必要的参考决策,最后通过仿真和实验验证了该方法的有效性。

**关键词:** 谐波小波;信号消噪;非平稳信号;时频分析;特征检测

**中图分类号:** TM726.1;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

## Voltage fault signal feature detection of wind power integration based on harmonic wavelet

Li Xiaojing<sup>1</sup> Chen Xin<sup>1</sup> Wu Guodong<sup>1</sup> Wang Feng<sup>1</sup> Chen Shibin<sup>2</sup>

(1. State Grid Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730030, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Aiming at solve the problem of the power quality influence by wind power integration, the integration characteristics and fault characteristics of wind power station is the thorough analysis, a novel method is proposed in this paper, the method makes combination with harmonic wavelet noise reduction and time-frequency joint analysis, and it is used for voltage fault signal feature extraction of wind power integration, this method has solved the problems that the traditional Fourier transform can't process the fault testing signal with non-stationary character. The method makes full use of harmonic wavelet noise reduction technology for purification of non-stationary voltage fault test signal in strong noise, and then the time-frequency combined analysis is used to accurately locate the voltage fault of wind power integration, the method is able to provide necessary reference decision for fault crossing. Finally, the effectiveness of the method is verified by simulation and experiment.

**Keywords:** harmonic wavelet; noise reduction; non-stationary signals; time-frequency analysis; feature detection

## 0 引言

能源发展一直以来都是世界各国的关注重点,清洁能源的应用恰是当前解决能源发展与环境保护矛盾的有效途径,风力发电以其突出的优势得到了大力推广,全球风力发电装机总容量不断攀升,仅2017年全球风电新增装机容量就有近60 000 MW<sup>[1]</sup>,并且多年来保持5%的增长率。随着大规模风力发电项目的建设投用,风电并网问题成为了人们的关注重点,对于电网而言,大规模风电的接入势必会对电网的稳定性造成不良的后果,由此将对电网的电能质量及电力输送的经济型产生巨大影响<sup>[2-5]</sup>。正是由于风力发电对于环境、设备及气象因素具有极高的依赖程度,并且

对于电网电能质量的影响具有高度随机性,因此,在综合考虑电网对电能质量的要求日趋提高的前提下,风力发电并网对于电网电能质量的影响成为了当前新能源大力推广下的研究重点和热点问题。

风力发电并网故障将对电网电能质量产生极其不利的影 响,严重的会导致风电大面积脱网事故的发生,因此开展风电系统运行状态进行实时监测方面的研究具有极其重要的实际意义,并且能够有效促进电网的故障穿越和电能质量恢复能力<sup>[6-7]</sup>,因此本文所需要解决的问题就是能够对电网故障进行准确检测和精确定位,从而保证电网能够实现准确的故障穿越和电网电压恢复。针对于风力发电并网过程中电网具有故障穿越能力方面的研究,国内外学者开展

了大量的研究工作。Abbey 等<sup>[8]</sup>综合考虑了电网电压跌落技术在不同风力发电系统的影响情况,深入分析了电网电压跌落将导致的瞬态不稳定性情况,构建了特征状态之间的关系,提出了风力发电建设的参考;张兴等<sup>[9]</sup>针对于风机并网下电网电能质量突发性故障出现时,局部系统在电网电压跌落时暂态不稳定而导致系统全面瘫痪的情况下,全面综述分析了定速异步风机、同步直驱式风机和双馈式风机 3 种主要机型进行低电压穿越的方案;胡家兵等<sup>[10]</sup>针对双馈式风机风电系统在电网电能质量发生故障时系统具有故障穿越能力,提出了改进控制方案,从而保证了在电网电压骤降的扰动下发电机不从电网上解列,从而避免更大扰动的产生并且避免严重事故的发生。

风力发电并网故障的特征在于测试信号大多呈现时变性和非平稳特性<sup>[11]</sup>,与此同时风力发电并网通常采用远距离输电的方式,通常会受到多种外界因素的干扰,由此使得电网电压检测信号成为了强噪声干扰信号,采用常规的方法极难解决强噪声背景下的信号消噪问题<sup>[12-13]</sup>。在这样的情况下对电网故障特征进行精确定位具有较高的难度,无法对电网故障特征进行精确定位使得功率补偿器件的启停时间难以得到确认,这极大地影响了电网的稳定性。包广清等<sup>[14]</sup>针对并网电压故障,采用了经验模态分解方法对信号预处理,再利用形态学方法对分解信号进行降噪,对 25 dB 信噪比信号进行了分析,为无功补偿装置的投切控制提供参考;凌玲等<sup>[15]</sup>利用了数学形态学的方法对动态电能质量进行扰动检测和分类,有效滤除了尖峰噪声信号,提高了检测准确性。然而目前常用的非平稳信号处理方法通常都具有运算量大的特点,在实时性方面很难满足电网实际运行情况下的故障特征提取的需要,基于以上这些情况,本文提出一种在复杂背景噪声下风力发电并网故障特征信号进行降噪和定位的方法,该方法结合谐波小波(harmonic wavelet, HW)和短时傅里叶变换(STFT)方法,能够对测试信号快速降噪处理,保持故障特征的非平稳特性,并且可以准确判断故障特征的起止时间,为功率补偿器件的投切时间提供更加准确的参考。

## 1 风力发电并网特征

风力发电是当前我国建设规模最大的新能源发电形式之一,在我国风力发电的建设和推广得到了国家的大力支持,国家发改委和国家能源局更是在 2016 年权威发布了《风电发展“十三五”规划》<sup>[16]</sup>,极大地促进了风力发电的建设,规范了风力发电的发展及应用,并且对“十三五”期间 2017~2020 年的可再生能源发展规模进行了规划,还出台了《关于可再生能源发展“十三五”规划实施的指导意见》<sup>[17]</sup>,各地政府也积极响应号召,推出适用于当地的风力发电建设规划及市场消纳措施。风力发电场多采用集中式发电并网的形式,以我国西部地区风力发电并网运行为例,西部地区具有良好的风力资源和地理环境资源,但风力发

电场多建于远离负荷中心的极度偏远地区,通常采用高压远距离并网的形式,西部地区某风力发电场并网系统结构如图 1 所示。

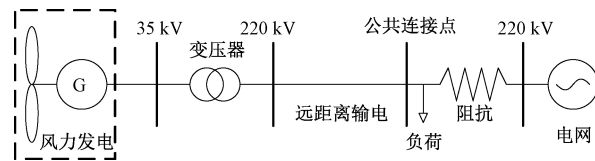


图 1 风力发电场并网系统结构

由图 1 可以看出,风电资源通过一系列的组件和远距离输电实现并网运行,由此将受到较多的外界因素干扰,这将影响电网电压的稳定性,风力发电机组发电并网时需要根据气象条件频繁切换运行状态操作,即使是在持续运行状态下也会由于环境因素导致输出稳定性受到影响,由此将引起电网电压闪变值和相对电压波动,进而影响用电设备的正常运行,严重的将导致局部电网脱网,甚至还会带来巨大的安全威胁。

基于风力发电并网的这些特征,使得风力发电并网故障检测工作的作用得以凸显,对并网电压故障检测的准确性则依赖于对测试信号的准确分析和处理,由于外界因素的扰动使得测试信号含有大量的噪声,因此对测试信号进行消噪成为了必要手段,对故障特征进行精确定位可以有效促进电网电压故障的恢复,本文基于此而开展了以下的工作。

## 2 HW 消噪

风力发电并网电压故障特征相对较为复杂,测试信号含有的噪声也具有相对较高的强度,信噪比较低,并且风力发电并网电压故障信号通常都具有非平稳特性,因此采用传统的方法无法对测试信号进行准确处理,HW 能够在强噪声背景下对非平稳信号进行提纯处理,并且在算法实时性方面具有突出优势,因此采用 HW 对风力发电并网故障信号进行消噪是较为合理的手段。

### 2.1 HW 滤波基本原理

谐波小波的概念是在 1993 年由剑桥大学的学者 Newland 提出的,HW 具有明确的数学表达式,在频域上的表达式如下:

$$W(\omega) = \begin{cases} 1/2\pi, & 2\pi \leq \omega \leq 2\pi \\ = 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

而在时域上的表达式则为:

$$w(t) = [e^{j4\pi t} - e^{j2\pi t}]/j2\pi t \quad (2)$$

由此可见,HW 是一种复小波,其具有明确的时域频域波形,并且相互对应,图 2 所示为 HW 在时域和频域之中的波形,其时域波形由实部和虚部构成,实部为偶函数,虚部为奇函数,因此 HW 在锁相能力方面具有突出优势,对电力系统测试信号具有良好的相位保持功能。

利用 HW 对信号新进行滤波提纯,首先需要对 HW 进

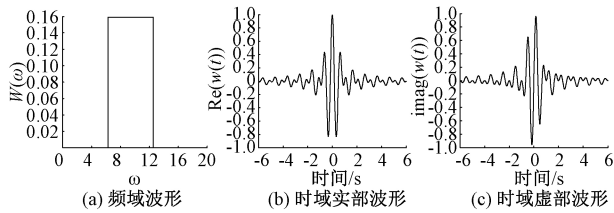


图 2 谐波小波时域频域波形

行伸缩、平移构成 HW 族,之后利用频域中的 HW 对待提纯信号滤波提纯,最后再将频域信号反变换为时域信号,其滤波过程可表示为:

$$x_p(t) = IFFT(X(\omega) \cdot W_{m,n}(\omega)) \quad (3)$$

式中:  $X(\omega)$  是待提纯信号  $x(t)$  的频域变换结果;  $W_{m,n}(\omega)$  是频域内的 HW;  $m$  和  $n$  是小波伸缩变换尺度范围。

## 2.2 HW 降噪实验

风电并网测试信号具有具有极其复杂的特性,含有大量的噪声信号,使得信号的信噪比极度降低,尤其是在电网电能质量发生故障的情况下,测试信号就更加难以准确分析,采用 HW 降噪的方法能够有效降低外界噪声对测试信号产生的干扰,极大地改善信号的信噪比。为了验证这一特性,现针对最为常见的风电并网电压跌落故障进行分析,采用 HW 对测试信号进行降噪提纯,系统采样频率为 10 kHz,电压跌落的起止时间为 0.06 和 0.12 s,电压跌落程度达到 50%,噪声信号为高斯白噪声,含噪声测试信号的信噪比为 15 dB,其信号时域及频谱分析波形如图 3 所示。

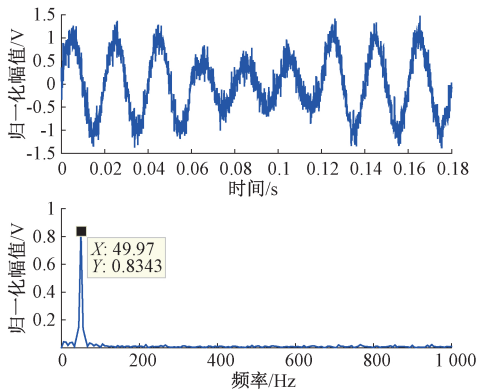


图 3 含噪声测试信号

从图 3 可以看出,含噪声测试信号在时域波形上具有电压跌落特征,时域波形由于受到噪声的干扰已经发生了形变,在频域分析中,电网电压工频信号附近产生了大量的谐波信号。利用 HW 对含有噪声的测试信号进行提纯处理,由此得到的提纯信号时域和频域分析结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,经过 HW 的滤波作用,提纯信号在时域上得到了明显的改善,大量的噪声干扰被消除,信号时域波形更加的清晰,故障特征信号的额非平稳特征得以保留,从时域信号结果中就可以看出电压跌落现象的发生,在

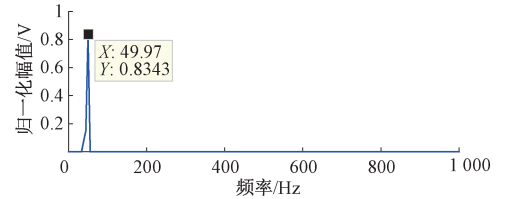
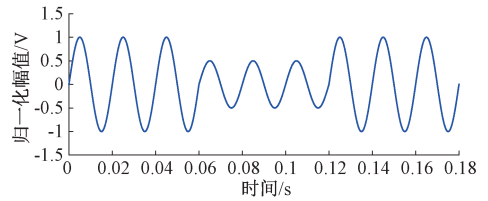


图 4 提纯信号

频域方面,频率特征更加纯净,工频信号的幅值极为明显,大量的谐波干扰被有效抑制,通过对信噪比的分析发现,采用 HW 对含噪声信号进行提纯后信噪比提高至 55 dB,然而,采用传统的频谱分析结果无法表示电压跌落的过程,只获取到整个过程中的幅值均化结果,从频谱分析结果中无法确定故障特征发生的具体时间节点。

## 3 故障特征精确定位

风力发电并网系统电压跌落故障具有非平稳的特性,采用 HW 能够对噪声信号进行有效降噪,但是结合传统的频谱分析结果无法表示信号的非平稳变化过程。对于风力发电并网系统,当电压跌落 15~50% 时,则需要电网能够通过无功补偿装置提供无功,从而保证供电网具有低电压穿越的能力,而此时则需要对故障进行准确的判断和精确定位,从而保证无功补偿装置能够在恰当的时机提供补偿功能。STFT 是一种时频联合分析的信号处理方法,在瞬时频谱变换方面具有极其明显的优势,在此可采用 STFT 的方式实现电压跌落故障的精确定位。STFT 对于信号的变换通过以下原理实现:

$$X(\tau, \omega) = STFT\{x(t)\}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

式中:  $x(t)$  为待分析信号;  $\omega(t)$  为窗函数;  $\tau$  决定了窗宽。利用 STFT 对含噪声信号和提纯信号分别进行时频联合分析,得到如图 5 所示的分析结果。

从图 5 的时频联合分析结果可以看出,采用 HW 对信号进行提纯以后,频谱分析结果变化更加平缓,由此可以判断,噪声信号得到了明显的抑制,在时频联合分析结果中,提取工频对应的幅值变化点,即可获得电压故障发生的起止时间,利用时频分析结果对于电压跌落故障定位的判断结果如表 1 所示。

从分析结果可以看出,利用时频联合分析的方法可以实现电网电压故障的定位功能,当电网电压测试信号含有噪声时,故障定位结果产生了相对较大的误差(起始时间

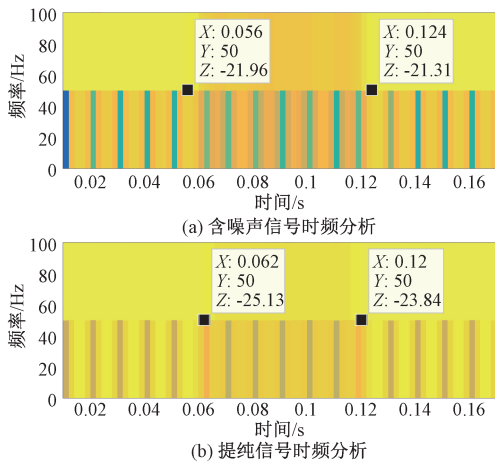


图 5 测试信号时频联合分析

表 1 电压跌落故障定位结果

	起始时间/s	误差/ms	终止时间/s	误差/ms
含噪声信号	0.056	-4	0.124	4
提纯信号	0.062	2	0.12	0

-4 ms, 终止时间 4 ms), 而利用 HW 对测试信号进行了提纯, 提纯后的信号在故障定位方面得到了明显的改善。

由此可见, 本文提出的方法能够对强噪声背景下的电网电压故障信号进行提纯, 并且可以对故障发生的起止时间进行准确定位, 进一步可以此判断结果为基础, 开展电网电压故障自动识别方面的工作。

## 4 结 论

风力发电并网势必会存在故障, 由于外界及内在的综合作用, 使得并网电压故障存在复杂性和非平稳特性, 并且具有大量的噪声干扰, 在复杂的强噪声背景下, 采用传统的信号处理方式无法准确判断故障特征并且无法对故障进行精确定位, 本文以强噪声背景下的电压跌落故障为研究对象, 提出了一种可以有效抑制测试信号噪声并且能够准确对故障进行定位的方法, 通过理论分析和实验验证了该方法的有效性, 主要得到了以下的结论。

1) 利用 HW 的方法能够有效降低风力发电并网电压跌落故障测试信号的噪声干扰, 提纯后的信号时域特性和频谱特征都更加清晰, 能够大幅提高测试信号的信噪比, 然而结合传统的频谱分析方法无法准确反映非平稳故障特征的变化过程。

2) 利用 STFT 的时频联合分析方法, 可以准确展现风力发电并网电压跌落故障特征的变化过程, 并且可以利用分析结果对故障特征进行准确定位。

3) 提纯信号对于故障定位大幅提高, 具有更加明显的优势, 对于故障特征的精确定位能够为故障调整装置提供必要的参考, 也可以进一步提高风力发电并网系统的故障

穿越能力, 对工程实践具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 中国产业发展研究网. 2017 年全球风电行业新增装机容量、累计装机容量及占比前景预测 [EB/OL]. <http://chinaidr.com/tradenews/2017-07/114576.html>, 2017-07-25/2018-10-01.
- [2] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12):62-66.
- [3] 郭琳, 王萍, 王慧慧, 等. 风力发电并网电压扰动信号的分析与检测[J]. 电源学报, 2015, 13(5):15-21.
- [4] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006(8):21-26.
- [5] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(20):55-62.
- [6] BOLLEN M H J, OLGUIN G, MARTINS M. Voltage dips at the terminals of wind power installations[J]. Wind Energy, 2010, 8(3):307-318.
- [7] SUN T, CHEN Z, BLAABJERG F. Voltage recovery of grid-connected wind turbines with DFIG after a short-circuit fault [C]. Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2004:1991-1997.
- [8] ABBEY C, JOOS G. Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005:1901-1907.
- [9] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2):1-8.
- [10] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006(8):21-26.
- [11] 李加升, 杨金辉, 吴顺秋. 风能发电并网时引起的电压波动与闪变检测的仿真研究[C]电磁测量技术、标准、产品国际研讨及展会, 2010.
- [12] 王丽霞. 基于信号处理的电能质量扰动检测与识别[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- [13] 李从飞. 电能质量扰动检测与分类方法研究[D]. 芜湖:安徽工程大学, 2017.
- [14] 包广清, 宋泽, 吴国栋, 等. 基于经验模态分解和形态学的风电并网电压故障检测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11):219-225.
- [15] 凌玲, 徐政. 基于数学形态学的动态电能质量扰动的检测与分类方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5):62-66.
- [16] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 风电发展“十三五”规划[R]. 2016.
- [17] 国家能源局. 关于可再生能源发展“十三五”规划实施的指导意见(国能发新能[2017]31号) [R]. 2017.

## 作者简介

李晓晶, 高级工程师, 主要从事电力系统调度自动化相关领域的研究工作。

陈仕彬(通信作者), 高级工程师, 主要从事电力系统自动化相关领域的研究工作。

E-mail: 15002698420@163.com