

基于线性补偿的宽频相量测量方法及其测试

易善军¹, 李原¹, 马宁嘉², 李华伟², 苏鹏¹, 戴幸涛¹, 谢小荣²

(1.国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古呼和浩特 010010; 2.清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 随着可再生能源发电和电网中电力电子设备的占比不断提高, 电力系统的宽频振荡已成为制约可再生能源消纳的重要因素。为抑制高比例可再生能源电力系统的宽频振荡与满足保护需求, 文章提出了一种宽频相量的测量方法, 并研制了相应的装置。首先, 该装置基于加窗的离散傅里叶变换算法和三峰插值算法, 实现多路多模态电压、电流的宽频相量测量; 然后, 基于线性回归的方法补偿了高频振荡相量的幅值和相位测量结果, 在保障动态响应速度的同时, 有效提高了装置的测量精度; 最后, 基于测试仪和实时数字仿真平台测试验证了所研制装置的宽频相量测量性能, 为保障新型电力系统安全稳定运行及可再生能源消纳提供了数据支撑。

关键词: 宽频振荡; 可再生能源消纳; 线性回归; 相量补偿

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)04-0506-07

0 引言

随着可再生能源发电和电力电子设备在新型电力系统中的占比不断提高, 电力电子设备与电网之间相互作用引发的宽频振荡问题日益显著^[1-3]。近年来, 我国多地发生过可再生能源发电及柔性交直流输电系统宽频振荡事件^[4], 如: 河北某风电场曾频繁发生次同步谐振现象, 导致多台风机因谐波过量而触发保护动作, 造成了机组脱网事故^[5,6]; 新疆某风电场曾发生过 35 Hz 左右的次同步振荡, 导致多台火电机组因触发转轴扭振保护动作而停运^[7]; 鲁西输电系统因发生过 1 270 Hz 左右的高频振荡, 导致柔性直流单元失稳跳闸^[8,9]等。宽频振荡已成为制约可再生能源发展、威胁系统安全稳定运行的主要问题之一^[10], 亟需研制宽频相量测量装置, 实现新型电力系统的宽频振荡在线监测, 对后续有效抑制振荡、保障系统安全稳定运行具有重要意义。

考虑到已发生的宽频振荡事件频率范围, 宽频相量测量装置的目标是实现 2.5~2 500 Hz 的谐波和间谐波相量测量^[11]。目前, 国内外针对次/超同步(3~100 Hz)相量测量算法的研究已较为成熟, 随着电力电子设备占比增加, 中高频相量测量算法的研究也逐渐引起重视。文献[12]提出的自适应相量测量方法有效提高了测量精度和抗噪声能力, 但主要针对的是同步相量的测量, 宽频相量测

量的适用性并未开展深入研究与测试验证。文献[13]提出了一种基于希尔伯特黄变换的 3~45 Hz 次同步振荡参数及时-频变化关系辨识方法, 虽然有利于系统次同步振荡的早期预警, 但缺乏更高频振荡测量功能的分析与验证。文献[14]提出了一种基波、间谐波和同步谐波相量的测量方法, 但测量范围有限, 无法测量中高频段的间谐波相量, 且测量响应延时较大。文献[15,16]提出了基于自适应滤波的次同步振荡相量测量方法, 虽然对于多模式振荡相量测量有较高的准确度, 但是尚未开展中高频相量测量的相关研究。文献[17,18]报道了一种能够实现 2.5~2 500 Hz 宽频相量测量的装置, 但是该装置采用 1 s 时间窗测量 100~2 500 Hz 内的相量, 响应速度较慢。文献[4]基于离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)算法提出了一种对 2.5~2 500 Hz 宽频相量的测量方法, 提高了测量装置的响应速度和准确度, 但是对于 300 Hz 以上的高频振荡相量的测量误差较大。可见, 已有的宽频相量测量研究大多停留在测量算法研究阶段, 虽有研究机构研制了次/超同步振荡相量测量装置, 但并不具备中高频相量测量功能, 而已有的宽频相量测量装置也存在多模态测量下响应速度慢、高频下受电压/电流互感器影响精度差等问题。因此, 宽频相量测量方法及装置在较短时间窗内实现宽频谐波、间谐波相量的测量,

收稿日期: 2023-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51925701); 国网内蒙古东部电力有限公司科技项目(SGMD0000DDJS2250017)。

通信作者: 谢小荣(1975-), 男, 博士, 正高级教授, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

且有效避免高频下互感器等因素的影响,实现多模态宽频带振荡快速、准确监测的装置成为难点^[19]。

针对现有宽频相量测量的问题和难点,本文提出了一种基于线性回归补偿的宽频相量测量方法,并研制了一种宽频相量测量装置,该装置可安装在可再生能源发电站等区域,基于10个基波周波时间窗数据同时实现至少4路8模式的宽频相量监测,且针对2.5~2 500 Hz的振荡相量均具有较高的测量精度。该装置首先基于加窗DFT算法和三峰插值算法得到振荡相量初步结果;然后结合抽样测试结果,基于线性回归算法补偿了高频振荡相量的幅值和相位测量结果,提高了装置的测量精度;最后基于理想信号和实时数字仿真(Real Time Digital Simulation, RTDS)对装置进行测试,验证了所研制宽频相量测量装置的性能。

1 宽频相量测量及补偿方法

文献[4]提出的宽频相量监测装置采用DFT算法对振荡相量进行辨识,并通过加窗的方式改善频谱泄漏问题,再结合三峰插值算法提高宽频相量幅值、相位和频率的精度。首先对装置采样的电压、电流信号进行汉宁加窗DFT计算:

$$I_m[k] = \frac{2}{\sum_{n=0}^{N-1} H(n)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} H(n) \cdot i_m(n) \cdot e^{-j2\pi \frac{n}{N} k} \quad (1)$$

式中: $I_m[k]$ 为各相频谱分析结果; m 为A,B,C三相标识; $i_m(n)$ 为时间窗($n \in [1, N]$)内各相电压、电流的采样信号; k 为谱线编号,即 $k=0, 1, \dots, N-1$; $H(n)$ 为汉宁窗函数。

在DFT频谱分析结果中,搜寻对应谐波分量的极值点,并结合设定的阈值消除噪声对搜寻准确度的影响^[17]。最后,计算得到有效极值点对应的谐波相量幅值、相位和频率,其表达式为

$$A'_i = |I_m[i]| \cdot \frac{\pi \cdot \Delta_i}{\sin(\pi \cdot \Delta_i)} \cdot (1 - \Delta_i^2) \quad (2)$$

$$p'_i = \angle I_m[i] - \pi \Delta_i \quad (3)$$

$$\hat{f}_i = f_s \cdot (i + \Delta_i) / N \quad (4)$$

式中: i 为极值点对应的谱线编号; A'_i, p'_i 和 \hat{f}_i 分别为基于三峰插值算法得到的谐波相量幅值、相位和频率; f_s 为采样频率; Δ_i 为插值因子,即:

$$\Delta_i = 2 \frac{|I_m[i+1]| - |I_m[i-1]|}{|I_m[i+1]| + 2|I_m[i]| + |I_m[i-1]|} \quad (5)$$

在测量装置中,可以通过以上方法得到宽频相量的初步测量结果。但通过测试发现:基于已有方法所研制出的装置对于低频段(2.5~300 Hz)相量的测量精度基本符合要求;而对于高频段(300~2 500 Hz)相量,幅值和相位的测量误差随着振荡频率的增加而逐渐增大。这主要是由于在实际装置中,相量计算所输入的电压、电流信号需要通过电压互感器和电流互感器测取,而受互感器中变压器和补偿电抗器电感线圈的杂散电容等因素影响,互感器对高频信号存在失真现象^[20,21]。互感器的宽频信号传递特性主要受到互感器内部参数的影响^[22],可以采用“拟合测试误差进行补偿”的思路提高装置对宽频相量的测量精度,即:结合装置对理想信号的测试结果,拟合宽频相量幅值和相位测量误差与频率之间的函数关系,然后在已有方法计算结果的基础上进行补偿。测试发现,在300~2 500 Hz频段中的测量误差与振荡频率之间的关系近似线性,因此可通过线性回归的方式对高频振荡下的幅值和相位测量结果进行补偿。

设置若干个高频振荡理想信号的测试场景,则回归分析的误差补偿函数为

$$\begin{cases} \Delta A = W_1 \cdot f + b_1 \\ \Delta p = W_2 \cdot f + b_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta A, \Delta p$ 分别为相量幅值和相位的补偿值; f 为相量频率; W_1, W_2, b_1 和 b_2 为回归参数。

可基于最小二乘法计算回归参数的最优值,即目标函数为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^M \{[A(f_i) - A'(f_i)] - \Delta A(f_i)\}^2 \\ \min \sum_{i=1}^M \{[p(f_i) - p'(f_i)] - \Delta p(f_i)\}^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为补偿测试所设置的振荡模态总数量; $A(f_i), A'(f_i)$ 和 $\Delta A(f_i)$ 分别为振荡频率为 f_i 时相量幅值的理论值、补偿前的测量值和回归分析得到的补偿值; $p(f_i), p'(f_i)$ 和 $\Delta p(f_i)$ 分别为振荡频率为 f_i 时相量相位的理论值、补偿前的测量值和回归分析得到的补偿值。

振荡相量的幅值和相位补偿后, \hat{A}_i, \hat{p}_i 分别为

$$\hat{A}_i = A'_i + \Delta A \quad (8)$$

$$\hat{p}_i = p'_i + \Delta p \quad (9)$$

综上所述,由式(4),(8)和(9)可得到采样电压、电流的宽频相量测量结果。

2 宽频相量测量装置开发与设计

基于本文提出的相量测量及补偿方法研制宽频相量测量装置,如图 1 所示。

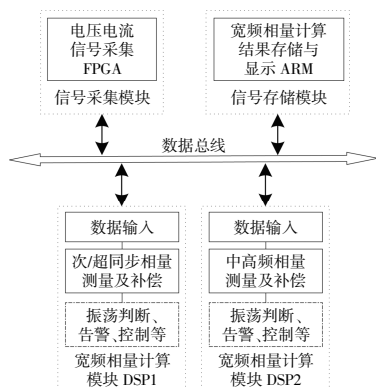


图 1 宽频相量测量装置硬件架构图

Fig.1 Hardware architecture of wideband phasor measurement device

该装置模块主要包括信号采集、宽频相量计算模块、信息存储和显示。其中:基于可编程逻辑门阵列(Field Program-mable Gate Array, FPGA)实现电压/电流互感器输出的电压、电流信号采集;基于数字信号处理器 (Digital Signal Processing, DSP)实现对输入信号各路各相电压、电流相量的测量、补偿等功能。

图 2 展示了该模块的主要工作流程。



图 2 宽频相量测量及补偿流程图

Fig.2 Flow chart of wideband phasor measurement and compensation

为了提高装置的计算速度,可采用两片 DSP 芯片并行计算,分别在较长和较短的基波周波时间窗(设定为 10 个和 2 个)内对次/超同步相量和中高频相量进行并行测量及补偿;基于 ARM 处理器实现测量结果的存储和显示等功能;各芯片

通过数据总线实现数据的传输与交换。基于 DSP 的宽频相量测量及补偿具体步骤包括:①通过数据总线输入基于 FPGA 采集得到的电压、电流信号;②对电压、电流采样信号进行汉宁加窗 DFT 运算,得到各相的频谱分析结果;③计算各谱线的模值,搜索频谱范围内的极值点,并结合设定的幅值阈值筛选满足条件的谐波/间谐波分量;④基于式(2)~(5)三峰插值算法计算宽频相量的幅值、相位和频率;⑤基于样本测试及回归分析结果,对中高频相量的幅值和相位进行补偿;⑥整理计算得到的宽频相量,并通过数据总线发送至 ARM 中的存储与显示模块。需要注意,针对高频相量幅值和相位的补偿测试,可以从同一批生产的装置中抽取若干装置作为样本,通过测试和回归分析,得到适合该批装置的最优误差补偿函数,然后再在各装置的 DSP 中加入补偿的算法,从而实现对各相的测量补偿。该装置主要针对宽频相量的测量与补偿,但是其功能具有较好的扩展性,可以结合实际情况在 DSP 芯片中扩展宽频振荡的判断、告警以及控制保护等功能。例如,当检测到电压/电流振荡相量幅值大于幅值越限判据的设定值,或宽频振荡阻尼小于振荡发散判据的阻尼比设定值且持续一段时间后,装置发出宽频振荡告警信号,进一步基于测量得到的宽频相量数据进行振荡溯源,根据振荡保护判据判断是否需要实施振荡保护措施。

3 装置测试结果与分析

3.1 单模态相量测试

为了验证所研制宽频相量测量装置的精度,利用理想信号发生器生成基波分量和单谐波分量的组合电压、电流信号,输入到研制的宽频相量测量装置中进行测试,并与已有的、未加入补偿的相量测量方法^[4](下称“补偿前的测量方法”)进行对比。测试搭建的实验平台如图 3 所示。

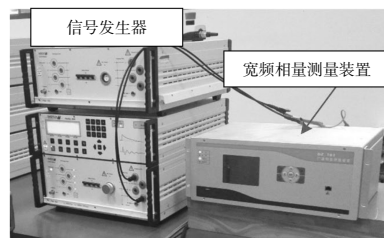
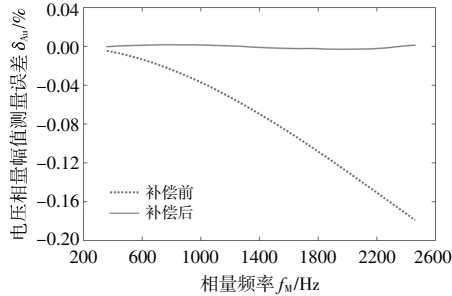


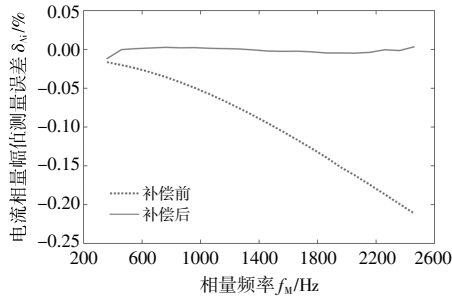
图 3 实际测试场景图

Fig.3 Picture of actual testing scenarios

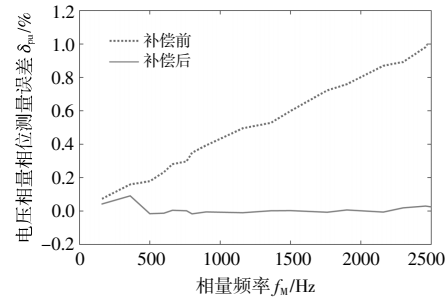
在 2.5~2 500 Hz 内改变振荡分量的频率,对比补偿前及补偿后电压、电流相量的测量结果,得到宽频电压、电流的幅值和相位的误差,如图 4 所示。其中补偿前的测量方法对 2.5~300 Hz 频段内的相量测量误差较小,因此不进行补偿。



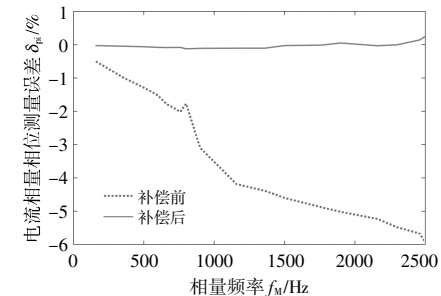
(a)电压相量幅值测量误差



(b)电流相量幅值测量误差



(c)电压相量相位测量误差



(d)电流相量相位测量误差

图 4 不同振荡频率下的宽频相量测量误差

Fig.4 Measurement error of wideband phasor with different oscillation frequencies

对补偿前的测试误差进行回归分析,得到误差补偿函数为

$$\begin{cases} \Delta A_u = -0.000\ 08f + 0.030 \\ \Delta A_i = -0.000\ 40f + 0.036 \\ \Delta p_u = -0.000\ 40f - 0.040 \\ \Delta p_i = -0.002\ 60f + 0.010 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta A_u, \Delta A_i, \Delta p_u$ 和 Δp_i 分别为电压、电流相量的幅值和相位补偿值。

由图 4 可知,随着振荡频率的增加,补偿前的测量方法对电压/电流振荡相量的幅值和相位测量误差均逐渐增大,已不适用于具有宽频振荡特征的新型电力系统。该误差与振荡频率之间存在近似线性的关系,因此所设计的宽频相量测量方法及装置基于样本测试及回归分析进行了补偿,有效地降低了 300~2 500 Hz 高频下的相量幅值和相位测量误差。中国电科院提出的《宽频测量装置检测方案》^[23] 中要求谐波幅值测量误差不大于 5%、相位测量误差不大于 5°、频率测量误差不大于 1 Hz。而在该测试场景中,补偿后装置对 2.5~2 500 Hz 的宽频相量测量幅值误差不大于 0.55%、相位误差不大于 1.1°、频率误差不大于 0.07 Hz,并且采用的数据时间窗不超过 0.2 s(10 个基波周波)。因此,经过线性回归补偿的宽频相量测量装置的精度和速度完全符合要求。

3.2 多模态相量测试

为进一步测试宽频相量测量装置对多路信号及多个模态的处理能力和测量准确度,利用理想信号发生器输入 4 路 8 模态的理想电压电流信号。其中每路信号的波形相同,A 相电压、电流信号分别为

$$\begin{aligned} U(t) = & 50\cos(2\pi \cdot 50t) + 11\cos(2\pi \cdot 31t) + \\ & 14\cos(2\pi \cdot 88t) + 10\cos(2\pi \cdot 688t) + \\ & 15\cos(2\pi \cdot 1\ 030t) + 13\cos(2\pi \cdot 1\ 159t) + \\ & 12\cos(2\pi \cdot 1\ 644t) + 16\cos(2\pi \cdot 1\ 879t) + \\ & 9\cos(2\pi \cdot 1\ 967t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I(t) = & \cos(2\pi \cdot 50t) + 0.11\cos(2\pi \cdot 31t) + \\ & 0.14\cos(2\pi \cdot 88t) + 0.10\cos(2\pi \cdot 688t) + \\ & 0.15\cos(2\pi \cdot 1\ 030t) + 0.13\cos(2\pi \cdot 1\ 159t) + \\ & 0.12\cos(2\pi \cdot 1\ 644t) + 0.16\cos(2\pi \cdot 1\ 879t) + \\ & 0.09\cos(2\pi \cdot 1\ 967t) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11),(12)可知,由于补偿算法主要针对高频振荡相量,因此设置的谐波中包括 2 个次/超同步谐波分量(频率分别为 31,88 Hz)和 6 个中高频谐波分量(频率分别为 688,1 030,1 159,

1 644,1 879,1 967 Hz)。B,C 相电压电流的基波和谐波分量在 A 相的基础上相位分别相差 -120° 和 120° 。

对比装置的测量值和输入信号的实际值,得到其中一路的多模态宽频相量测量误差,如表 1 所示。其他三路信号的测量误差与表 1 结果接近。

表 1 多模态宽频相量测量误差
Table 1 Measurement error of multi-mode wideband phasor

振荡频率 Hz	幅值误差/%		相位误差/($^\circ$)		频率误差 Hz
	电压	电流	电压	电流	
31	0.063	1.121	0.012	0.037	0.001
88	0.035	1.143	0.045	0.042	0.000
688	0.179	0.133	0.084	0.450	0.009
1 030	0.189	0.067	0.103	0.566	-0.012
1 159	0.139	0.026	0.120	0.540	-0.017
1 644	0.153	0.306	0.173	0.633	-0.009
1 879	0.226	0.542	0.195	1.015	-0.012
1 967	0.055	0.444	0.243	0.378	-0.066

由表 1 可知,在该测试场景中,研制的装置对次/超同步频段和中高频段下的相量幅值测量误差不大于 1.2%、相位测量误差不大于 1.1° 、频率测量误差不大于 0.07 Hz,均满足文中的相关要求^[23],即该装置可以实现多路多模态信号的宽频相量测量。

3.3 实时数字仿真测试

为进一步验证所设计的相量测量装置在宽频振荡检测方面的有效性和可靠性,对该装置进行 RTDS 测试。实验装置之间的连接关系和搭建的 RTDS 实验平台如图 5 所示。其中从 RTDS 的输出端采集三相电压、电流信号,经过功率放大器适当放大后作为宽频相量测量装置的输入信号。另外,RTDS 和宽频相量测量装置之间还会传输模型线路断路器的状态反馈信号和开断控制信号,便于后续开发装置的宽频振荡判断、告警以及控制保护等。

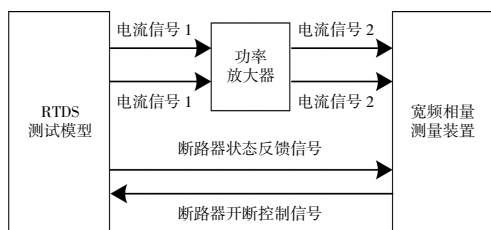


图 5 RTDS 实验平台

Fig.5 Experimental platform of RTDS

测试所采用的仿真算例为双馈风电机组 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)经串补线路并网系统,风电机组经 0.69/35 kV,35/220 kV,220/500 kV 三级升压后接入 500 kV 电网,系统结构如图 6 所示。

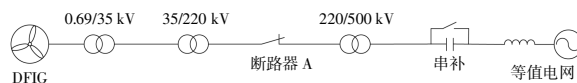


图 6 算例系统结构示意图

Fig.6 Example system structure diagram

双馈风机的额定功率为 3.0 MW,其他基本参数见表 2。

表 2 双馈风电机组的基本参数

Table 2 Basic parameter of DFIG

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	3	定子绕组电阻/pu	0.020
额定电压/kV	0.69	定子绕组漏抗/pu	0.27
额定频率/Hz	50	转子绕组电阻/pu	0.025
直流电容/F	0.005	转子绕组漏抗/pu	0.30
直流电容电压/kV	1.5	励磁电抗/pu	12.7

在系统初始运行时,风速 $v=12$ m/s,断路器 A,B 均闭合,即风电机组接入电网,而串联电容补偿器(Fixed Series Capacitor, FSC)未投入运行。在 $t=0.3$ s 时投入 FSC 后,系统发生振荡且呈发散趋势,对风电机组输出电流的记录数据进行 FFT 分析,将电流频谱结果作为基准。用所设计的宽频相量测量装置对风电机组输出电流进行实时监测,得到装置监测结果及误差,如表 3 所示。

表 3 风电机组输出电流相量测量结果

Table 3 Measurement results of DFIG output current phasor

模态序号	物理量	计算值	测量值	误差
1	频率/Hz	6.000	5.998	-0.002 Hz
	幅值/A	1.392	1.393	0.718%
	相位/($^\circ$)	32.450	32.600	0.150 $^\circ$
2	频率/Hz	94.000	94.016	0.016 Hz
	幅值/A	1.128	1.126	-0.177%
	相位/($^\circ$)	62.160	62.370	0.210 $^\circ$

由表 3 可知,在该 RTDS 仿真测试中系统发生次/超同步振荡,宽频相量测量装置对风电机组输出电流的振荡相量幅值测量误差不大于 0.8%、相位测量误差不大于 0.3° 、频率测量误差不大于 0.02 Hz,测量结果可以满足振荡的告警、保护等功能需求。

4 结论

高比例可再生能源电力系统的宽频振荡问题

严重制约了可再生能源消纳,威胁系统安全稳定运行。为实现宽频振荡的在线监测,本文提出了一种基于线性回归补偿的宽频相量测量方法,并研制了相应的装置。该装置基于加窗 DFT 算法和三峰插值算法可同时实现多路多模态宽频相量的快速测量,并通过线性回归算法有效提高了高频振荡相量的测量精度。实验测试结果表明,该装置对宽频带振荡相量的幅值、相位和频率均具有较高的测量精度,可满足可再生能源发电和柔性交直流输电等场景下宽频振荡抑制和保护对相量测量的需求。

参考文献:

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
- [2] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4732.
- [3] 戴礼国,杨浩,陈力,等.基于深度强化学习的风电柔直并网系统次同步振荡抑制方法 [J]. 智慧电力,2023,51(4):1-7,91.
- [4] 伍双喜,陈全,杨银国,等.面向宽频振荡抑制的宽频相量测量装置[J].电力自动化设备,2022,42(8):215-220.
- [5] Wang L,Xie X R,Jiang Q R,et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J].IEEE Transaction on Power Systems,2015,30(5):2772-2779.
- [6] 吴雪黎,王莹莹,赵伟华,等.一种融合多特征信息的电网宽频振荡控制方法及装置 [P]. 北京:CN115693706A,2023-02-03.
- [7] Liu H K,Xie X R,He J B,et al. Sub-synchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC net-works [J].IEEE Transaction on Power Systems,2017,32(6):4708-4720.
- [8] Man J F,Xie X R,Xu S K,et al. Frequency-coupling impedance model-based analysis of a high-frequency resonance incident in an actual MMC-HVDC system[J]. IEEE Transaction on Power Delivery,2020,35(6):2963-2971.
- [9] 冯俊杰,邹常跃,杨双飞,等.针对中高频谐振问题的柔性直流输电系统阻抗精确建模与特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4805-4820.
- [10] 马宁宁,谢小荣,唐健,等.“双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):457-464.
- [11] Lei C,Xie X R,He J B,et al. Wideband oscillation monitoring in power systems with high-penetration of renewable energy sources and power electronics:A review [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2023,175:113-124.
- [12] 刘灏,李珏,毕天姝,等.一种自适应同步相量测量方法[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5063-5071.
- [13] 张家军,张新燕,高亮,等.基于振荡分量时频特性的次同步振荡早期预警[J].电测与仪表,2020,57(19):21-26.
- [14] Liu H,Bi T,Xu S,et al.A full-view synchronized measurement system for the renewables,controls,loads,and waveforms of power-electronics-enabled power distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2022,13(5):3879-3890.
- [15] Xie X R,Liu H K,Wang Y,et al. Measurement of sub-and super-synchronous phasors in power systems with high penetration of renewables [A].2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference[C].Minneapolis:IEEE,2016.1-5.
- [16] 谢小荣,王银,刘华坤,等.电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法 [J]. 电力系统自动化,2016,40(21):189-194.
- [17] 樊陈,姚建国,常乃超,等.电网宽频振荡实时监测技术方案[J].电力系统自动化,2021,45(11):152-159.
- [18] 吴艳平,姚建国,常乃超,等.多功能宽频测量装置的设计与实现[J].电力系统自动化,2020,44(20):136-141.
- [19] 顾文,吕万,杨宏宇,等.电力系统次同步振荡的检测技术综述[J].电测与仪表,2022,59(7):9-18.
- [20] 彭庆华,陈龙,康文斌,等.电容式电压互感器谐波测量误差分析[J].高电压技术,2015,41(3):956-962.
- [21] 刘浩,姜春阳,周峰,等.电压互感器宽频误差自动测量装置及试验研究 [J]. 科学技术与工程,2019,19(25):220-224.
- [22] 杨永鑫.电容式电压互感器谐波传递特性及宽频准确测量技术研究[D].济南:山东大学,2022.
- [23] 中国电力科学研究院.宽频测量装置检测方案[M].北京:中国电力科学研究院,2019.

Method and testing of wideband phasor measurement based on linear compensation

Yi Shanjun¹, Li Yuan¹, Ma Ningjia², Li Huawei², Su Peng¹, Dai Xingtao¹, Xie Xiaorong²
(1.State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co. Ltd., Hohhot 010010, China; 2.Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the high penetration of renewable energy and electronic equipment, the problem of wideband oscillation in power systems is becoming increasingly prominent, which has become a key factor restricting the efficient consumption of renewable energy. A wideband phasor measurement method is proposed and the corresponding device is developed to satisfy the requirements of wideband oscillation mitigation and protection in power systems with renewable energy. Based on the windowed discrete Fourier transform and three -peak interpolation, this device can measure multi -mode wideband phasor of multiple voltages and currents. Besides, the amplitude and phase of high - frequency phasor are compensated based on the linear regression, which effectively improves the measurement accuracy of the device while ensuring the dynamic response speed. Finally, the measurement performance of the developed device was verified by experimental testing with testers and real -time digital simulation, and the device can provide support for ensuring the safety and stability of power systems and the consumption of renewable energy.

Keywords: wideband oscillation; renewable energy consumption; linear regression; phasor compensation