面向宽频振荡抑制的宽频相量测量装置

伍双喜1,陈 垒2,杨银国1,谢小荣2,刘 洋1

(1. 广东电网有限责任公司 电力调度控制中心,广东 广州 510600;2. 清华大学 电机系,北京 100084)

摘要:快速实时测量宽频相量对于宽频振荡抑制有着重要意义。然而,已有宽频相量测量装置主要面向监测 类应用,响应速度慢。研制了一种面向宽频振荡抑制的宽频相量测量装置。该装置采用加窗插值离散傅里 叶变换算法,实现多模式宽频相量测量;采用较短时间窗缩短算法的动态响应时间;通过2个数字信号处理 器并行计算分别完成基波和谐波/间谐波相量测量。通过性能测试发现,所研制的宽频相量测量装置响应 速度快、准确度高,能满足宽频振荡抑制等应用对相关性能的要求。

DOI:10.16081/j.epae.202205037

0 引言

2021年,我国承诺分别在2030年和2060年实 现碳达峰和碳中和目标。发展新能源发电技术是实 现上述2个目标的必由之路,这必然会使新一代电 力系统的"双高"特征(即高比例新能源发电和高比 例电力电子设备特征)越来越突出[1],进一步导致宽 频振荡事件频发[2]。据不完全统计,近年来国内外 发生了多起严重的振荡事件,频率涵盖数 Hz 至数 kHz^[3],例如:2015年,新疆哈密风电场发生了次同步 振荡现象,振荡频率在较大范围(10~40 Hz)内变化, 具有显著的时变特征;2017年,我国某背靠背柔性直 流输电工程出现了1272 Hz左右的高频振荡现象, 导致换流器跳闸;2018年,渝鄂柔性直流输电工程 在调试期间分别出现了700 Hz和1810 Hz的振荡。 宽频振荡问题正严重威胁我国电力系统的安全稳定 运行,因此非常有必要研制宽频相量测量装置,实现 宽频振荡参数的在线测量,从而为自适应主动抑制 宽频振荡提供振荡频率等关键信息。

宽频振荡抑制的目标是在宽频分量幅值达到阈 值前实现振荡镇定,振荡发散达到该阈值的时间与 发散率密切相关,发散较快时可能在数个振荡周期 内即达到阈值。这就要求测量算法响应速度非常 快,即要求时间窗非常短,而这将加剧宽频振荡间谐 波的频谱泄露效应,从而影响宽频相量测量的准确 度。另外,安装在风电汇集站的宽频振荡相量测量 装置需要完成多线路三相电压、电流信号的相量测 量,因此要求测量算法的计算量必须足够低,从而实 现宽频相量的在线快速测量。

收稿日期:2022-01-08;修回日期:2022-03-30 在线出版日期:2022-05-06

基金项目:中国南方电网公司科技项目(GDKJXM20198228) Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(GDKJXM20198228)

已有宽频相量测量装置主要面向宽频振荡的监 测类应用,响应时间较慢,因此难以用于宽频振荡的 抑制。例如:文献[4]报道了一种全景测量系统,可 以测量次 / 超同步间谐波相量、同步基波相量和 同步谐波相量,但其无法实现中高频振荡相量的测 量,且次 / 超同步间谐波相量的测量延迟超过1s, 响应速度慢,难以用于宽频振荡抑制;文献[5-6]报 道了一种宽频振荡测量装置并提出了一种电网宽频 振荡实时监测技术方案,该装置能实现2.5~2500 Hz 的宽频相量测量,但其采用1s的时间窗进行100~ 2500 Hz范围内的宽频相量测量,响应速度也较慢, 难以用于宽频振荡抑制;文献[7]报道的宽频相量测 量装置的采样频率达到25.6 kHz,相量频率范围为 0~10 kHz,且主要面向宽频振荡监测。另外,国内相 关研究团队也研制了次 / 超同步间谐波相量测量装 置[8-9],相关装置首先对各个模式进行滤波,然后进 行离散傅里叶变换DFT(Discrete Fourier Transform) 以得到相量测量结果。然而当振荡模式较多时,滤 波次数较多,计算量较大,因此该装置难以用于宽频 相量测量。

另外,大量文献提出了宽频相量测量算法。文 献[10]对已有的次同步振荡参数的测量算法进行了 综述。文献[11]和文献[12]均提出了基于自适应滤 波的次同步振荡参数测量算法,即使在多模式振荡 情况下,算法依然具有很高的准确度,但这2种算法 所采用的时间窗均达到了1s,动态响应速度较慢。 文献[13]提出了一种迭代泰勒-傅里叶多频率模型 方法,该方法具有较高的准确度,但其计算量随着 振荡模式个数的增加而急剧增加,因此难以在线应 用。文献[14-15]从电压、电流波形中滤除基波分 量,然后分别利用过零点法和DFT法计算次同步振 荡参数,算法的响应速度较快,但在基波频率偏离额 定值时,算法测量准确度降低。文献[16]提出的峭 度 ESPRIT算法考虑了不超过 300 Hz 的中频振荡参 数测量问题,但该算法的计算量大,难以在线应用。 可见,上述测量算法仍不能应用于面向宽频振荡抑 制的宽频相量测量。

理论上,基波和谐波相量测量算法也可以用于 宽频相量测量,例如:文献[17-19]以sinc插值函数 和虚指数函数等为基函数对动态谐波相量进行建 模,从而提高了动态谐波相量的测量准确度;文献 [20-21]针对暂态情况下的基波相量快速跟踪提出 了改进Kalman滤波方法。但宽频振荡信号中一般 存在多个谐波和间谐波分量,上述方法无法有效抑 制不同分量间的相互干扰,导致测量误差较大。

本文针对目前已有装置主要面向监测类应用、 已有算法响应速度慢、计算量大或误差大的问题,研 制了用于宽频振荡抑制的宽频相量测量装置,其主 要特点包括:①采用低计算量的加窗插值DFT算法, 使装置能实现8个模式的电压、电流宽频相量的测 量;②采用较短时间窗(100~2500 Hz为2个基波周 期,2.5~100 Hz为10个基波周期)提高测量装置的动 态响应速度。采用理想信号、PSCAD / EMTDC生成 的次 / 超同步振荡信号和高频振荡信号以及录波数 据对测量装置进行测试,验证了本文研制的宽频相 量测量装置的准确性。

1 宽频相量测量算法

1.1 算法原理

一般而言,发生宽频振荡后的系统电压、电流信 号包含基波分量和振荡间谐波分量,经采样后的信 号s[n]可表示为如下离散形式:

 $s[n]=a\cos(2\pi fnT_s+\phi)+a_1\cos(2\pi f_1nT_s+\phi_1)$ (1) 式中:n为时间窗;a和 a_1 分别为基波和振荡间谐波 分量的幅值;f和 f_1 分别为基波和振荡间谐波分量 的频率; ϕ 和 ϕ_1 分别为基波和振荡间谐波分量的初 相位; T_c 为采样间隔。

对时间窗 $n \in [1, N_w]$ 内的信号s[n]进行DFT,结果如式(2)所示。

 $S[m] = \sum_{n=1}^{N_{v}} w[n] s[n] e^{-j2\pi \frac{n}{N_{v}}m} \quad m = 0, 1, \dots, N_{w} - 1 \quad (2)$

式中:N_{*}为时间窗长度;w[n]为窗函数,本文采用常用的汉宁窗;m为谱线编号。设振荡间谐波频率附近幅值最大的谱线编号为M,该谱线对应了振荡间谐波分量在该谱线频率处的DFT计算结果。由于振荡频率可能不是基波频率的整数倍,DFT频谱分析结果会存在频谱泄露现象。为了提高算法的响应速度,一般需在较短的时间窗内进行DFT分析,这会进一步加剧频谱泄露现象。为提高振荡间谐波幅值、相位和频率等参数估计的准确性,可采用插值法实现振荡间谐波频率、幅值和相位的补偿^[22]。首先,通

过幅值最大谱线及其临近的2个谱线的模值计算得 到补偿参数δ,具体可以表示为:

$$\delta = \frac{2|S[M+1]| - 2|S[M-1]|}{|S[M-1]| + 2|S[M]| + |S[M+1]|}$$
(3)

进一步地,分别通过式(4)—(6)得到宽频振荡 频率、幅值和相位的估计值 \hat{f}_1 、 \hat{a}_1 、 $\hat{\phi}_1$ 。

$$\hat{f}_1 = (M + \delta) \frac{1}{N_{\rm w} T_{\rm s}} \tag{4}$$

$$\hat{a}_1 = \left| S[M] \right| \frac{\pi \delta}{\sin(\pi \delta)} (1 - \delta^2) \tag{5}$$

$$\hat{\phi}_1 = \angle S[M] - \pi\delta \tag{6}$$

由于次/超同步振荡频率靠近基波,需要采用 较长的时间窗保证振荡参数的测量准确度。而中高 频振荡频率距离基波较远,可采用较短的时间窗进 行振荡参数测量,以提高响应速度。对于2.5~100 Hz 和100~2500 Hz范围内的振荡间谐波参数测量,本 文分别采用10个和2个基波周期的时间窗进行DFT 分析。由于相量测量准确度与时间窗长度密切相 关,实际应用中可针对不同的频段采用不同的时间 窗长度。在得到信号的DFT分析结果后,对每个模 式的参数估计仅需进行如式(4)—(6)所示的简单插 值处理,因此利用本文算法在测量多模式宽频相量 时,计算量仍较小。

随着宽频振荡的发散,电压、电流信号中除存在 1个主导振荡模式外,还可能存在耦合振荡模式等 其他分量。一般情况下,宽频振荡耦合模式为2-4 个。为保留一定裕度,最多考虑测量8个振荡模式 的参数。其中,次/超同步振荡模式和中高频振荡 模式均最多考虑测量4个振荡模式的参数。另外, 在测量装置对测量结果进行存储和显示时,首先需 要对各个模式进行排序。

1.2 测量流程

宽频相量测量装置的测量流程如附录A图A1 所示,具体步骤说明如下。

1)输入电压、电流采样信号。本文考虑的最高 宽频振荡频率为2500 Hz,根据奈奎斯特定理,采样 频率须高于5000 Hz。因此本文研制的宽频相量测 量装置的采样频率设置为9600 Hz或12800 Hz,可 以满足实际应用的要求。

2)针对 2.5~100 Hz 和 100~2 500 Hz 的频率范 围,分别在 10个和 2个基波周波时间窗内,基于式 (2)对电压、电流信号进行 DFT 并计算 DFT 结果的 模值。

3)基于计算得到的模值,找出所有处在模值局 部极值位置且模值大于基波幅值的1%的谱线。由 于电压、电流信号中存在噪声,信号频谱中可能存在 部分谱线确实处在局部极值位置,但其并不代表真 正的振荡模式。因此,需要通过判断模值是否超过 基波幅值的1%的方法排除这些谱线。

4)分别在2.5~100 Hz 和 100~2 500 Hz 范围内筛 选出极值大小排序在前4名的振荡模式。

5)针对步骤4)中的每个振荡模式,采用式(3)--(6)计算振荡模式的幅值、频率和相位。

6)基于计算得到的各振荡模式的幅值,对所有 模式进行排序,并发送至数据存储和通信单元,完成 结果显示和上传。

1.3 宽频相量测量装置设计

本文研制的宽频相量测量装置的硬件架构如图 1所示。采用现场可编程逻辑阵列(FPGA)实现电 压、电流信号的采集。考虑到宽频相量测量装置除 了需要具备宽频相量测量功能外,还需要具备同步 基波相量测量功能,分别采用2台数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor)实现上述2种功能,并 在装置内对2种功能采用并行处理模式,其中宽频 相量测量算法和流程分别按1.1节和1.2节实现。待 上述2台DSP测量得到各振荡模式的相量并且完成 排序后,可以进一步完成宽频振荡判断、振荡告警、 录波触发,并通过通信总线传输至数据存储器中 完成测量结果存储。同时,基于ARM处理器,完成 测量结果的屏幕显示功能和数据上传功能。所有 的宽频相量测量数据基于 IEEE C37.118-2011 标 准进行时标标记和数据打包,数据上传速率设定为 100帧/s。针对GPS/北斗同步时钟可能短时失去 的问题,本装置通过使采样脉冲与同步时间基准秒脉 冲信号的同步误差小于1µs维持较高的同步精度。



图 1 宽频相量测量装置硬件架构 Fig.1 Hardware architecture of wideband

phasor measurement device

2 装置性能测试

宽频相量测量装置测试平台如附录A图A2所示,设置采样频率为9600Hz。由于已有的功率源 无法同时输出存在多个振荡模式的电压、电流,因此 通过上位机生成电压、电流信号并下发至宽频相量 测量装置,再由测量装置的回放功能生成电压、电流 信号,上位机与测量装置之间通过网络端口和串口 2种形式相连,如图A2所示。

2.1 基于理想信号的测试

本节通过生成理想信号测试宽频相量测量装置 的准确度和动态响应性能。针对准确度性能测试, 输入的A相电压和电流信号分别如式(7)和式(8) 所示,其均含有4个次/超同步间谐波分量和4个中 高频振荡间谐波分量,频率分别为12、31、69、88、 219、773、1413、1979 Hz,将对应的振荡模式编号为 1—8。B、C相各分量的幅值和频率与式(7)或式 (8)中一致,但各分量的相位与A相相位分别相差 -120°、120°。

 $U(t) = 57.735 \cos(2\pi \times 50 t) + 10 \cos(2\pi \times 12 t) +$ $11 \cos(2\pi \times 31 t) + 17 \cos(2\pi \times 69 t) +$ $14 \cos(2\pi \times 88 t) + 8 \cos(2\pi \times 219 t) +$ $9 \cos(2\pi \times 773 t) + 15 \cos(2\pi \times 1413 t) +$ $16 \cos(2\pi \times 1979 t)$ (7)

 $I(t) = \cos(2\pi \times 50 t) + 0.1 \cos(2\pi \times 12 t) + 0.11 \cos(2\pi \times 31 t) + 0.17 \cos(2\pi \times 69 t) + 0.14 \cos(2\pi \times 88 t) + 0.08 \cos(2\pi \times 219 t) + 0.09 \cos(2\pi \times 773 t) + 0.15 \cos(2\pi \times 1413 t) + 0.16 \cos(2\pi \times 1979 t)$ (8)

表1为宽频相量测量装置的幅值、相位和频率的误差。由表可见,最大幅值误差接近1%,最大相 位误差接近2°,最大频率误差为0.14 Hz。根据中国 电力科学研究院编写的《宽频测量装置检测方案》^[23], 要求间谐波最大幅值、相位和频率误差分别不超过 5%、5°和1 Hz。显然,本文研制的宽频相量测量装 置完全满足相关要求。从表1还可以发现,虽然采 用了更长的时间窗进行测量,次/超同步间谐波幅 值、相位和频率误差明显大于中高频振荡间谐波的 测量误差。这主要是由于次/超同步频段靠近基波 分量和振荡镜像频率分量,对振荡间谐波频谱造成 干扰,导致测量误差较大。

表1	宽频相量测量装置的幅值、	相位和频率误差
14 1	処況旧主防主依旦日間日、	

Table 1 Magnitude, phase and frequency errors of wideband phasor measurement device

		-				
振荡 模式	幅值误差 / %		相位误差 / (°)		频率误差 / Hz	
	电压	电流	电压	电流	电压	电流
1	0.89	0.89	1.56	1.56	0.04	0.04
2	1.06	1.06	2.09	2.09	0.06	0.06
3	0.90	0.91	1.84	1.83	0.05	0.05
4	0.19	0.19	0.73	0.74	0.02	0.02
5	0.85	0.85	1.00	1.00	0.14	0.14
6	0.28	0.28	0.02	0.02	0.01	0.01
7	0.29	0.29	0.08	0.08	0.04	0.04
8	0.27	0.27	0.03	0.03	0.01	0.01

对于动态响应速度性能测试,参考文献[8]中的 测试方法,向装置注入由单振荡分量和基波分量组 合而成的信号,测试装置在振荡电压、电流发生幅值 跳变10%、相位跳变10°和频率跳变0.5 Hz时的响应 时间。图2展示了电流信号发生幅值跳变时,装置 的幅值测量结果(间谐波频率为1979 Hz),图中幅 值为标幺值。可以发现,该实验条件下装置的响应 时间仅为10 ms,具有很快的响应速度。

218



图 2 幅值跳变情况下的电流幅值测量结果 (间谐波频率为1979 Hz)

Fig.2 Current amplitude measurement results under amplitude step condition (interharmonic frequency is 1979 Hz)

表2为不同频段内宽频相量测量装置的最大响应时间。由表可见:在次/超同步频段内,虽然幅值跳变的响应时间达到了150 ms,但频率跳变时的响应时间仅为其一半左右;针对中高频振荡相量测量的响应时间不超过30 ms。而文献[12]中设计的次/超同步相量测量装置的响应时间超过300 ms。因此,本文研制的宽频相量测量装置的响应速度明显快于文献[12]中的装置。另外,由于宽频振荡需要一段时间发展才能达到危害系统安全的程度,因此本文研制的装置的响应时间非常短,可用于振荡抑制。



Table 2 Maximum response time of wideband

phasor measurement device

作支		响应时间 / ms	
1水初	幅值跳变	相位跳变	频率跳变
次 / 超同步振荡	150	130	70
中高频振荡	30	20	20

2.2 采用含噪声的信号测试

在式(7)和式(8)所示的电压、电流信号中,添加 信噪比为60 dB的高斯白噪声,并在装置中生成上 述信号。表3为噪声污染下宽频相量测量装置的幅 值、相位和频率误差。与表2中的结果相比,噪声污 染下宽频相量测量装置的幅值、相位和频率误差均 有一定增长,但涨幅均较小,最大幅值误差仍接近 1%,最大相位误差接近2°,最大频率误差为0.19 Hz。 因此,噪声对本文研制的宽频相量测量装置的测量 准确度性能影响较小。

2.3 采用 PSCAD / EMTDC 生成的宽频振荡信号 测试

在 EMTDC 中搭建如附录 A 图 A3 所示的双馈风 电场-柔性直流-交流电网互联系统,在系统中激发 次同步振荡和高频振荡,然后将振荡信号输入到测 量装置中,测试测量装置的性能。图 A3 中,风电场

表 3 噪声污染下宽频相量测量装置的 幅值、相位和频率误差

 Table 3
 Magnitude, phase and frequency errors of wideband phasor measurement unit under

noise pollution condition

振荡 模式	幅值误差 / %		相位误差 / (°)		频率误差 / Hz	
	电压	电流	电压	电流	电压	电流
1	0.95	0.92	1.60	1.72	0.04	0.04
2	1.07	1.08	2.13	2.19	0.06	0.06
3	0.92	0.97	1.88	1.85	0.05	0.05
4	0.23	0.21	0.82	0.81	0.02	0.02
5	0.93	1.00	1.11	1.39	0.15	0.19
6	0.41	0.44	0.29	0.51	0.04	0.07
7	0.37	0.39	0.28	0.38	0.07	0.08
8	0.33	0.38	0.17	0.30	0.03	0.05

由 200 台双馈风电机组聚合而成,单台风电机组容 量为2 MW。风电场出口经升压变压器、交流线路、 降压变压器连接至柔性直流输电系统。柔性直流输 电系统由风电场侧换流站和交流电网侧换流站背靠 背连接而成。风电机组和柔性直流变流器的控制策 略及控制参数与文献[24]中一致。柔性直流输电系 统出口经由升压变压器连接至交流电网,交流电网 部分的拓扑与文献[25]中的一致。通过断开输电线 路激发高频振荡。分别在风电场侧(测量点1)和交 流电网侧(测量点2)配置宽频相量测量装置。

分别在图A3所示的互联系统中激发次 / 超同 步振荡和高频振荡,测试宽频相量测量装置的性能。 首先,交流电网侧各输电线均闭合,逐渐增加风电机 组台数,当增加到120台时,系统发生次 / 超同步振 荡;然后在测量点1处对电压、电流波形进行录波, 并通过上位机将录波注入宽频相量测量装置中实现 振荡波形的回放,并测量宽频相量。

图 3 为次 / 超同步振荡 A 相电压波形及其频 谱。图中,计算频谱时所采用的时间段为 0.2~2.2 s,





频谱分辨率为1 Hz。通过图 3(b)可以发现,电压波 形中含有 16 Hz / 84 Hz 的次 / 超同步振荡分量。

采用本文研制的宽频相量测量装置对2~4 s内的次/超同步振荡电压、电流波形进行处理,基于电流和电压波形测量得到的次/超同步振荡频率平均值分别为16.00 Hz / 83.96 Hz 和16.00 Hz / 83.98 Hz,结果非常接近。另外,虽然本文研制的宽频相量测量仅采用10个周期的时间窗,即频谱分辨率为5 Hz,但频率测量结果与图4中的频谱分析结果吻合。综上所述,本文研制的宽频振荡相量测量装置在测量次/超同步振荡频率时具有很高的准确性。

在图 A3 所示的互联系统中激发高频振荡,具体 地,将双馈风电机组台数设定为100台,并逐渐断开 交流电网中的输电线路,从而在系统中激发出高频 振荡。利用测量点2处的宽频相量测量装置测量相 应的高频振荡相量和频率。测量点2处的C相电流 波形及其频谱如附录A图A4所示。图中,计算频谱 时所采用的时间段为2~3 s,频谱分辨率为1 Hz。由 图可见,测量点2处的C相电流波形中存在1272 Hz 的高频振荡分量。

采用本文研制的宽频相量测量装置对1~2s内的高频振荡电压、电流波形进行处理,基于电压、电流波形测量得到的高频振荡频率平均值分别为1272.04、1272.05Hz,该结果与图A4中的频谱分析结果基本一致,这说明本文所研制的宽频振荡测量装置在测量高频振荡频率时也具有很高的准确性。

2.4 采用现场录波数据的测试

国内某风电场发生的次/超同步振荡事件的A 相电流波形及其频谱如附录A图A5所示。从频谱 图可以知道,该振荡电流信号中含有近似22.8 Hz/ 77.3 Hz的次/超同步振荡分量,即电流信号中含有 多个振荡分量。采用本文研制的宽频相量测量装置 对该振荡电流波形进行分析处理,基于电流波形测 量得到的次/超同步振荡分量频率为22.79 Hz/ 77.30 Hz,与图A5中的频谱分析结果接近,这说明本 文所研制的宽频相量测量装置可以用于实际宽频振 荡参数测量。

3 结论

本文研制了一种面向宽频振荡抑制的宽频相量 测量装置,介绍了宽频相量测量算法原理和流程,并 展示了测量装置的硬件架构;分别基于理想信号和 PSCAD / EMTDC 仿真生成的振荡信号测试了测量 装置的性能,验证了装置具有较高的准确性和较快 的响应速度,能满足宽频振荡抑制对准确性和响应 速度的要求;通过基于录波数据的测试验证了本文 研制的宽频相量测量装置可以用于实际宽频振荡参 数测量。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 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.
 XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE,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.
 MA Ningning,XIE Xiaorong,HE Jingbo,et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of CSEE,2020,40(15): 4720-4732.
- [3] 谢小荣,李浩志.电力系统振荡研究进展[J].科学通报,2020, 65(12):1119-1129.
 XIE Xiaorong, LI Haozhi. Advances on power system oscillation[J]. Chinese Science Bulletin,2020,65(12):1119-1129.
- [4] 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 / OL]. IEEE Transactions on Smart Grid. (2021-12-31)[2022-01-08]. https://ieeexplore.ieee.org/document/9536241. DOI:10.1109/TSG.2021.3112044.
- [5] 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.
 FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Technical scheme for real-time monitoring of wide-frequency oscillation in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2021, 45(11):152-159.
- [6] 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.
 WU Yanping, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Design and implementation of multi-functional wide-frequency measurement device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(20):136-141.
- [7] 靳宗帅,张恒旭,石访,等. 宽频带同步测量技术与应用[J]. 中国电机工程学报,2022,42(7):2497-2508.
 JIN Zongshuai,ZHANG Hengxu,SHI Fang, et al. Synchronized wideband measurement technology and its applications[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(7):2497-2508.
- [8] 吴琛,马宁宁,刘旭斐,等.高比例新能源电力系统多模态振荡监测方法及装置设计[J].电网技术,2021,45(9):3496-3504.
 WU Chen, MA Ningning, LIU Xufei, et al. Monitoring method and device design of multimodal oscillation in high-proportion renewable power systems [J]. Power System Technology, 2021,45(9):3496-3504.
- [9] 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.
 MA Ningning,XIE Xiaorong,TANG Jian, et al. Wide-area mea-

surement and early warning system for wide-band oscillations in "double-high" power systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science & Technology),2021,61(5):457-464.

[10] 吴熙,陈曦,吕万,等.电力系统次同步振荡检测与在线定位技术综述[J].电力自动化设备,2020,40(9):129-141.
WU Xi, CHEN Xi,LÜ Wan, et al. Review of detection and online localization technology of sub-synchronous oscillation in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(9):129-141.

- [11] 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.
 XIE Xiaorong,WANG Yin,LIU Huakun, et al. Detection method for sub-synchronous and super-synchronous harmonic phasors in power system[J]. Automation of Electric Power Systems,
- [12] XIE X,LIU H,WANG Y,et al. Measurement of sub- and supersynchronous phasors in power systems with high penetration of renewables[C]//2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. Minneapolis, MN, USA:IEEE,2016:1-5.

2016,40(21):189-194.

- [13] CHEN L,ZHAO W,WANG F, et al. An interharmonic phasor and frequency estimator for subsynchronous oscillation identification and monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019,68(6):1714-1723.
- [14] GAO B, TORQUATO R, XU W, et al. Waveform-based method for fast and accurate identification of subsynchronous resonance events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3626-3636.
- [15] 王茂海,齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法
 [J]. 电力系统自动化,2016,40(18):149-154.
 WANG Maohai,QI Xia. Fast online detection method for power system sub-synchronous oscillation components
 [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(18):149-154.
- [16] 刘灏,任小伟,田建南,等.基于K-ESPRIT的快速宽频测量方法[J].电力系统自动化,2020,44(10):186-192.
 LIU Hao, REN Xiaowei, TIAN Jiannan, et al. Fast wide-frequency measurement method based on Kurtosis-estimation of signal parameters via rotation invariance technique[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(10):186-192.
- [17] CHEN L, ZHAO W, WANG Q, et al. Dynamic harmonic synchrophasor estimator based on sinc interpolation functions [J].
 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(9):3054-3065.
- [18] CHEN L, ZHAO W, WANG F, et al. Harmonic phasor estimator for P-class phasor measurement units [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (4): 1556-1565.
- [19] CHEN L, ZHAO W, XIE X, et al. Harmonic phasor estimation based on frequency-domain sampling theorem[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:

1-10.

- [20] HUANG C, XIE X, JIANG H. Dynamic phasor estimation through DSTKF under transient conditions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(11):2929-2936.
- [21] 黄纯,刘洁波,江亚群,等.考虑衰减直流分量的动态相量强跟踪测量算法[J].电力系统自动化,2018,42(11):136-142.
 HUANG Chun, LIU Jiebo, JIANG Yaqun, et al. Strong tracking filter algorithm for dynamic phasor measurement considering decaying DC component[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(11):136-142.
- [22] AGREZ D. Weighted multipoint interpolated DFT to improve amplitude estimation of multifrequency signal[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 287-292.
- [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,2019:1-34.
- [24] 李浩志,李景一,杨建军,等.抑制风电-柔直外送系统次同步振 荡的并联 VSC型次同步阻尼控制器[J/OL].电力自动化设备. (2022-03-30)[2022-04-26].https://kns.cnki.net/kcms/detail/ detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DLZS-2022012700A&uniplatform = NZKPT&v = ocgPdO8pp1XSKqbzp3dFdZYiwjGMuuYdSFXaXal6vkII9xapjzREbWB6IFr4IK6h. DOI: 10.16081/j.epae.20220-1030.
- [25] 陈全,谢小荣,于光远,等. 三相不平衡高频振荡的相量测量方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(24):142-148.
 CHEN Lei,XIE Xiaorong,YU Guangyuan, et al. Phasor measurement method for unbalanced three-phase high-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45 (24):142-148.

作者简介:



伍双喜(1984—),男,高级工程师,博士, 研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: wusx03@163.com);

陈 垒(1992—),男,博士,研究方向 为电力系统广域监测、稳定分析和控制等 (E-mail:chenleithu@hotmail.com)。 (编辑 任思思)

伍双喜

Wideband phasor measurement device for wideband oscillation mitigation

WU Shuangxi¹, CHEN Lei², YANG Yinguo¹, XIE Xiaorong², LIU Yang¹

(1. Power Dispatch & Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Measuring wideband phasor in a fast and online way is very important for wideband oscillation mitigation. However, the existing wideband phasor measurement devices are developed for monitoring applications, and have a long response time. In this regard, a wideband phasor measurement device for wideband oscillation mitigation is developed, which uses the windowed interpolation discrete Fourier transform to measure multi-mode wideband phasors. A short window is used to shorten the dynamic response time. Two digital signal processors are used to measure fundamental and harmonic / interharmonic phasors respectively. The performance tests show that the developed wideband phasor measurement device has fast response and high accuracy, which can satisfy the corresponding requirements in protection applications, such as wideband oscillation mitigation.

Key words: wideband oscillation; phasor measurement device; oscillation mitigation; discrete Fourier transform; response time 附录 A



图 A1 宽频相量测量装置测量流程

Fig.A1 Measurement procedure of wideband phasor measurement device



图 A2 宽频相量测量装置测试平台 Fig.A2 Test platform for wideband phasor measurement device



图 A3 双馈风电场-柔性直流-交流电网互联系统 Fig.A3 Interconnected system including DFIG wind power system, MMC-HVDC, and AC grid



图 A4 高频振荡 C 相电流波形及其频谱 Fig.A4 Waveform of phase C current of high-frequency oscillation and its spectrum



图 A5 具头状/起同步振荡事件 A 相电流波形及共频道 Fig.A5 Waveform of phase A current in actual sub-/super-synchronous oscillation event and its spectrum