

# 电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法

谢小荣<sup>1</sup>, 王 银<sup>2</sup>, 刘华坤<sup>1</sup>, 贺静波<sup>3</sup>, 徐振宇<sup>4</sup>

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084; 2. 国网江苏省电力公司常州供电公司, 江苏省常州市 213004; 3. 国家电力调度控制中心, 北京市 100031; 4. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

**摘要:** 针对现有基于基波相量检测的动态监测装置和系统不能满足精确检测次(超)同步谐波的要求, 提出一种能够同时检测次(超)同步谐波和基波相量的新方法, 它改进了现有定间隔采样相量校正算法, 通过自动频率检测、多模式滤波和相量校正方法, 可在信号内包含多个非整次谐波分量的情况下, 高精度检测出所有次(超)同步谐波和基波相量。给出了检测方法的原理和实现, 采用理想测试信号和工程实际数据测试并验证了方法的精度和抗噪声能力。

**关键词:** 次同步振荡; 次同步谐振; 相量校正算法; 动态监测

## 0 引言

近年来, 风电、光伏等新型可再生能源发电迅速扩展, 其渗透率不断提高。由风电机组控制器与交流电网之间的相互作用引起的次同步振荡(目前部分文献也称为次同步谐振或次同步控制相互作用<sup>[1]</sup>)问题日益凸显, 典型的如中国华北沽源地区 and 新疆山北地区风电相关的次同步振荡现象。次同步振荡在电网中主要表现为幅值较大的持续增长(发散)或恒幅的次同步和/或超同步电流、电压和功率谐波, 而且振荡频率会随机网方式的改变而变化, 影响电网和设备的安全运行, 甚至造成严重的稳定性事故或设备损伤, 危害极大。因此亟需对次(超)同步谐波进行动态监测, 对于准确把握次同步振荡的动态过程, 规避风险乃至进一步实施阻尼控制具有重要的作用。

现有的动态监测装置和系统, 如相量测量单元(PMU)和广域测量系统(WAMS)均以工频相量为目标, 未专门考虑次(超)同步谐波, 且为提高工频相量的测量精度, 通常将分数次和整数次谐波滤除, 导致不能准确反映次(超)同步谐波的动态, 不能满足次(超)同步谐波的监测要求<sup>[2-11]</sup>。

本文提出一种能够同时检测次(超)同步谐波和基波相量的新方法, 它能自动适应信号内各分量频率时变的情况, 高精度、快速检测出所有次(超)同步

谐波和基波的同步相量, 从而能用于电力系统次同步振荡的广域动态监测、分析、控制与保护。

## 1 经典基波相量测量方法的适用性分析

研究表明<sup>[2]</sup>, 定间隔采样的相量校正算法(以下简称经典相量算法)能够消除整数次谐波的影响, 并且在频率发生偏移时, 可精准检测相量, 避免频率泄漏影响, 是实现相量精准测量的有效方法。但是它不适用于检测次(超)同步振荡信息, 原因如下。

1) PMU 算法所基于信号模型一般不考虑分数次谐波, 一旦实际信号包含次(超)同步信号分量, 不但不能准确检测次(超)同步分量, 而且会严重影响基波相量测量结果。

2) WAMS 主站以相对较低的频率(通常为 50 Hz、少数为 100 Hz)收集 PMU 相量数据, 按照采样定律(能准确反映  $f_s/2$  的信息, 其中  $f_s$  为采样率), WAMS 中心将不能确保准确分析实际的次同步振荡现象<sup>[3,5]</sup>。

## 2 新的相量测量方法

### 2.1 基本原理

文献[2]提出的相量校正算法对于单一频率信号是适用的, 新方法的关键是在应用文献[2]算法之前, 检测出信号中的频率成分, 并将其分离开来。基于该思路所提出的相量测量方法如图 1 所示, 主要步骤包括: ①对电压、电流进行定间隔采样与模数转换生成数字信号; ②前置滤波, 消除低频(2.5 Hz 及以下)和低频(100 Hz 及以上)谐波的影响; ③信号的自适应频率检测, 即采用快速傅里叶变换(FFT)

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-06-21。

上网日期: 2016-08-23。

国家自然科学基金资助项目(51322701); 国家电网公司科技项目(SGXJ0000KXJS1500670)。

检测出幅值超过设定阈值的谐波成分,以下称为模式,假设模式的初始频率为  $f_{i0}$ ;④自适应模式滤波,针对各模式信号,根据初始频率进行带通滤波,从而将各次谐波分离出来;⑤分别对提取出来的模式信号进行相量校正计算,得到对应模式的初始相量信息(频率、幅值和相位);⑥对初始相量进行补偿,即补偿由于各级滤波环节产生的幅值和相位偏差;⑦相量数据集成处理,包括利用相电压、电流相量生成正负零序相量,标记同步时标等。上述过程中基波也是作为一个模式来处理的,因此最终可同时得到次(超)同步谐波和基波相量。以下对方法中关键的自适应频率检测与模式滤波、相量校正与补偿等功能进行更详细的叙述。

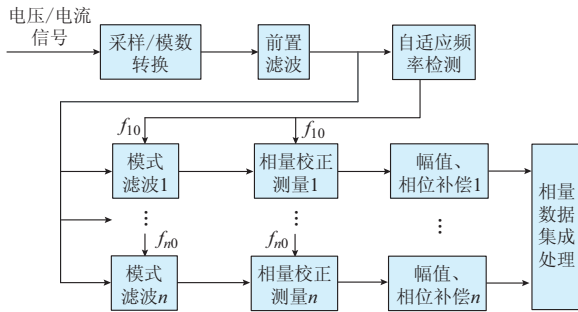


图1 次(超)同步谐波相量的检测原理

Fig.1 Principles of measuring sub-synchronous and super-synchronous harmonic phasors

## 2.2 自适应频率检测与模式滤波

自适应频率检测与模式滤波的功能是:对前置滤波后的信号进行离散傅里叶变换(DFT)/FFT分析,利用幅值-频率信息粗筛出信号中的次(超)同步和基波分量或模式,得到其对应的分辨率约为1 Hz的初始频率值;进一步利用该初始频率自动构建带通滤波器,从前置滤波后的信号中“抽取”出各个模式的信号分量。

设所关注的次(超)同步谐波频率最小和最大值分别为  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$ ;设 DFT/FFT 数据窗长为  $N_s$  (典型取值为  $N_s = f_s$ , 典型值为 1 200 Hz);  $f_{\min}$  频域分量中对应的最小整数点数  $N_{\min} = \text{Rounddown}(N_s f_{\min}/f_s)$ , 其中  $\text{Rounddown}(\cdot)$  为向下取整函数;  $f_{\max}$  频域分量中对应的最大整数点数  $N_{\max} = \text{Roundup}(N_s f_{\max}/f_s)$ ; 根据采样定理, 应使  $N_{\min}$  和  $N_{\max}$  介于 1 和  $N_s/2$  之间<sup>[12]</sup>。

设当前信号的当前采样点为  $x_k$ , 采集  $N_s$  个数据点  $x_{k-N_s+1}, x_{k-N_s+2}, \dots, x_k$ , 对当前数据窗进行 DFT/FFT 计算, 只需得到其中介于  $N_{\min}$  和  $N_{\max}$  之间的变换结果即可, 设为  $X_{N_{\min}}, X_{N_{\min}+1}, \dots, X_{N_{\max}}$ 。根据  $X_{N_{\min}}, X_{N_{\min}+1}, \dots, X_{N_{\max}}$  的模值, 即  $|X_{N_{\min}}|,$

$|X_{N_{\min}+1}|, \dots, |X_{N_{\max}}|$  的大小来检测次(超)同步谐波和基波初始频率值, 原理是: 得出一组整数集合  $\{n_i | N_{\min} < n_i < N_{\max}\}$ , 其对应的 DFT/FFT 结果集  $\{X_{n_i}\}$  中的相量满足下列条件: ①  $|X_{n_i}|$  或归一化值或相对于基波分量的值大于某预先设定的阈值, 目的是排除噪声的干扰; ②  $|X_{n_i}|$  相对于临近的其他相量而言是一个峰值点, 即在频谱曲线中,  $|X_{n_i}|$  是一个极大值。

设检测出  $n$  个次(超)同步谐波(和基波), 即集合  $\{n_i\}$  内元素的个数为  $n$ , 则对应的次(超)同步谐波(和基波)的初始频率为:

$$f_{i0} = \frac{n_i - 1}{N_s} f_s \quad 1 \leq i \leq n \quad (1)$$

值得注意的是, 自适应频率检测的精度与采样频率和数据窗长密切相关, 当采用 1 s 数据窗, 得到的精度或频率分辨率约为 1 Hz。同时, 当系统真实的次、超同步信号频率完全未知时, 频率检测需要一段相对较长的初始检测时间(1 s)。工程应用中可根据实际情况优化调整数据窗, 以兼顾精度与响应特性。

进一步, 自动构建  $n$  个带通滤波器, 也称为模式滤波器, 其具体实现可采用各种数字滤波器, 如二阶无限冲激响应(IIR)滤波器或有限冲激响应(FIR)滤波器, 每个模式滤波器的中心频率即为  $f_{i0}$ 。经前置滤波后的每一路信号(电压和电流)分别通过  $n$  个模式滤波器后, 即得到  $n$  个模式信号, 分别对应待检测的次(超)同步和基波分量, 供进一步相量校正与补偿模块使用。

带通滤波器采用如下简单两阶传递函数形式:

$$L(s) = \frac{G \left( \frac{s}{\omega_c} \right)}{1 + 2\xi \left( \frac{s}{\omega_c} \right) + \left( \frac{s}{\omega_c} \right)^2} \quad (2)$$

式中:  $G$  为增益系数;  $\xi$  为阻尼系数, 可以近似为  $\xi = 3\pi/\omega_c$ , 其中  $\omega_c$  为特征角频率,  $\omega_c = 2\pi f_c$ 。

式(2)有对应的数字滤波器形式, 且滤波器系数与中心频率的关系是可以由显式得到的, 因此, 当中心频率发生变化时, 计算滤波系数, 也就是滤波器重构的时间非常短, 不会带来长的时延。另外, 该滤波器本身产生的相位偏差在后续信号处理中是进行了补偿的, 其带来的误差非常小。

## 2.3 相量校正与补偿

相量校正与补偿的功能是: 对模式信号进行基于循环 DFT 的相量校正计算, 得到初始次(超)同步及基波相量信息(频率、幅值与相位), 进一步通过幅值和相位补偿, 纠正前置和模式滤波带来的幅值和

相位偏差,得到最终的模式信号相量<sup>[2,4]</sup>。

设经模式滤波后信号的当前采样点为  $x_k$ 、相量校正算法的数据窗间隔为  $m_i$ ,则经以下步骤计算各模式信号对应的相量。

1) 计算数据窗长  $N_i = \text{Round}(f_s/f_{i0})$ , 函数  $\text{Round}(\cdot)$  表示求近似值;取  $x_{k-N_i+1}, x_{k-N_i+2}, \dots, x_k$  共  $N_i$  个数据构成一个数据窗,对其进行循环 DFT 计算,得到对应的初始模式信号相量,设为  $\hat{X}_{ik}$ 。

2) 采用  $\hat{X}_{i(k-2m_i)}, \hat{X}_{i(k-m_i)}, \hat{X}_{ik}$  三个定间隔的初始模式信号相量,根据式(3)至式(8)进行相量校正计算,从而得到次(超)同步和基波相量的频率  $f_i$  和幅值/相位值  $\bar{X}_{ik}$ 。

$$h_{ik} = \frac{\hat{X}_{i(k-2m_i)} + \hat{X}_{ik} e^{j\left(\frac{4\pi m_i}{N_i}\right)}}{2\hat{X}_{i(k-m_i)}} \quad (3)$$

$$\theta_{ik} = -\frac{1}{m_i} \text{Angle}\left(h_{ik} + \left(h_{ik}^2 - e^{j\left(\frac{4\pi m_i}{N_i}\right)}\right)^{0.5}\right) \quad (4)$$

$$\Delta f_i = \frac{f_s \theta_{ik}}{2\pi} \quad (5)$$

$$f_i = \frac{f_s}{N_i} + \Delta f_i \quad (6)$$

$$C_{ik} = -\frac{\hat{X}_{i(k-m_i)} - \hat{X}_{ik} e^{-j(m_i \theta_{ik})}}{e^{-j(m_i \theta_{ik})} - e^{j\left(m_i \theta_{ik} + \frac{4\pi m_i}{N_i}\right)}} \quad (7)$$

$$\bar{X}_{ik} = (\hat{X}_{ik} - C_{ik}) \frac{N_i \sin\left(\frac{\theta_{ik}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{N_i \theta_{ik}}{2}\right)} e^{-\frac{j(N_i-1)\theta_{ik}}{2}} \quad (8)$$

为进一步提高测量精度并使经过不同信号处理通道或不同测量装置的相量具有可比性且实现严格

的时间同步,需对此前得到的相量逐一进行幅值和相位补偿,即先计算各模式相量此前所有滤波环节在其频率  $f_i$  上总的幅频和相频响应,设为  $\alpha_i$  和  $\varphi_i$ ;然后将相量  $\bar{X}_{ik}$  的幅值除以  $\alpha_i$ ,相位角减去  $\varphi_i$ ,得到补偿后的次(超)同步谐波和基波相量<sup>[13-14]</sup>。

### 3 算法测试

#### 3.1 理想信号分析

采用如式(9)所示的测试信号,它包含基波以及各两组次同步和超同步分量。

$$x(t) = 10\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + 5\cos(2\pi f_{s1} t + \varphi_{s1}) + 5\cos(2\pi f_{s2} t + \varphi_{s2}) + 5\cos(2\pi f_{s3} t + \varphi_{s3}) + 5\cos(2\pi f_{s4} t + \varphi_{s4}) \quad (9)$$

式中:基波  $f_0 = 49.5$  Hz,  $\varphi_0 = 30^\circ$ ;次同步谐波  $f_{s1} = 15.5$  Hz,  $\varphi_{s1} = 60^\circ$ ;  $f_{s2} = 35.5$  Hz,  $\varphi_{s2} = 90^\circ$ ;超同步谐波  $f_{s3} = 64.5$  Hz,  $\varphi_{s3} = 120^\circ$ ;  $f_{s4} = 84.5$  Hz,  $\varphi_{s4} = 90^\circ$ 。

采样频率为 1 200 Hz,数据窗长  $N = 1 200$ , DFT/FFT 分析得到的频率分辨率为 1 Hz,设幅值门槛为工频幅值的 10%,检测得到超过门槛值的频率区段有:14~16 Hz,34~36 Hz,48~52 Hz,63~66 Hz,84~86 Hz。这 5 个区域的极值点即为初始频率,分别为 15,35,50,65,85 Hz。根据初始频率构建模式滤波器,分别提取对应的模式信号。然后按照 2.3 节的相量校正与补偿算法得到次(超)同步与工频相量,如表 1 所示,并与理论值进行对比,可见幅值误差小于 1%,相位角误差小于  $1^\circ$ ,频率误差小于 0.001 Hz,说明该方法可准确测量相量值,尤其频率测量具有很高的精度。

表 1 测试信号参数的理论值与测量值比较

Table 1 Comparison of theoretical and measured parameters of test signal

初始频率/ Hz	频率 $f$ /Hz			初始相位 $\varphi/(\circ)$			幅值		
	实际值	计算值	误差值	实际值	计算值	误差值	实际值	计算值	误差百分比/%
15	15.5	15.501	0.001	60	60.429	0.429	5.0	5.032	0.64
35	35.5	35.500	0	90	89.043	-0.957	5.0	5.047	0.95
50	49.5	49.500	0	30	29.131	-0.869	10.0	10.052	0.52
65	64.5	64.500	0	120	119.039	-0.961	5.0	4.957	-0.86
85	84.5	84.500	0	90	89.091	-0.909	5.0	4.987	-0.27

在动态过程中,相量检测的响应时间受到关注。本方法中增加了自适应频率检测环节,但其得到的频率主要用于滤波器设计;而精确频率检测是由本节相量算法决定的,因此当频率变化不超过滤波器带宽时,算法对频率的响应时间主要由后者决定,其值约为 1.5 个被测谐波周期。考虑到实际系统中振荡频率可能时变,当变化速度较慢(如不高于

2 Hz/min)且检测到的频率偏移滤波器中心频率较远时(如 2 Hz),可动态调整滤波器参数,来满足检测精度的需要;根据测试,重建滤波器可在 2 ms 内完成,并经 1.5 个周期步入平稳输出期。

当振荡幅值发生波动时,如式(9)中次/超同步分量幅值按照  $A_{\text{sub}} = A_{\text{sup}} = 5 + \sin(t)$  变化时,检测结果如附录 A 所示,说明算法能适应振荡幅值波动



的情况。

### 3.2 白噪声和整数次谐波的影响分析

本文分别分析了随机噪声和高次整数次谐波对算法的影响。在上述理想信号上叠加 5% 基波幅值的白噪声,重复测试算法并与此前结果进行比较,结果表明:幅值和相角受白噪声影响很小,其值只在 0.1% 范围内变化,而频率值只在 0.01% 范围内变化。在理想信号上叠加 5% 的 3 次谐波和 3% 的 5 次谐波,再次计算并与此前结果进行对比,结果表明,增加谐波后相量值的变化不高于 0.01%,即整数次谐波对算法精度几乎没有影响。总的来说,由于前置滤波、模式滤波以及 DFT 对白噪声和整数次谐波具有良好的滤波效果,使得算法精度受白噪声和整数谐波的影响很小。

### 3.3 实际系统录波分析

以国家电网公司调度中心提供的 2015 年 8 月 25 日实测的山北 I 线三相电流数据为例来测试所提出的相量测量方法。数据长度为 5 s,采样率为 1 200 Hz。

首先,以 1 s 的数据宽度对实测电流进行基于 DFT/FFT 的自适应频率检测,得到幅频特性如图 2 所示。设置筛选阈值为 2 A,得到 7 个超过阈值的频率区段,其极值点作为初始频率,分别为 21, 31, 50, 60, 69, 79, 89 Hz。

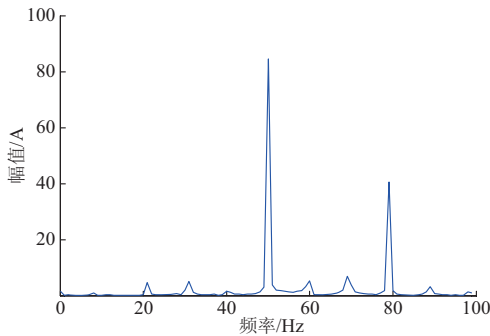


图 2 山北 I 线电流的幅频特性

Fig.2 Amplitude-frequency characteristics of current along Shanbei I line

然后,根据初始频率自动构建模式滤波器,从电流信号中分别提取各个振荡模式信号,然后经相量校正算法和幅值、相位补偿,得到各相电流的相量值,如表 2 所示。

为对比,同时采用经典相量算法计算了 A 相电流的基波相量,图 3 所示为经典算法与和本文算法得到的基波相量有效值。可见,经典算法由于未能有效消除次(超)同步信号的影响,得到的相量有效值出现大幅波动,不能正确反映基波相量的实际情况,而本文方法可得到平稳而准确的结果。

表 2 山北 I 线电流的相量值  
Table 2 Current phasors of Shanbei I line

初始频率/Hz	相别	频率/Hz	初始相位/(°)	幅值/A
50	A 相	50.039 9	-205.090 9	0.141 0
	B 相	50.039 5	-323.613 3	0.145 5
	C 相	50.039 9	-84.252 2	0.143 7
21	A 相	21.069 7	-145.061 3	0.008 2
	B 相	21.070 7	-260.101 5	0.008 6
	C 相	21.065 1	-20.331 7	0.008 8
31	A 相	30.748 4	-306.057 5	0.009 3
	B 相	30.739 6	-56.658 3	0.009 5
	C 相	30.739 7	-177.877 7	0.009 6
60	A 相	59.689 3	-30.538 1	0.010 5
	B 相	59.695 7	-151.154 9	0.010 9
	C 相	59.689 0	-267.554 3	0.011 0
69	A 相	69.344 0	-183.701 4	0.013 9
	B 相	69.337 4	-295.442 2	0.014 4
	C 相	69.344 7	-61.902 7	0.014 6
79	A 相	78.999 5	-327.708 2	0.068 5
	B 相	79.000 3	-85.463 8	0.069 7
	C 相	79.000 4	-205.731 8	0.070 6
89	A 相	88.650 1	-308.410 4	0.008 1
	B 相	88.642 3	-57.721 8	0.008 1
	C 相	88.644 1	-178.736 1	0.008 3

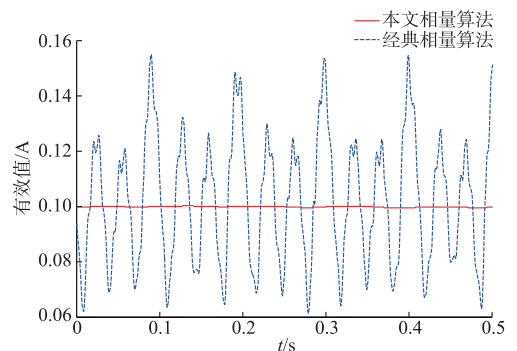


图 3 电流基波相量有效值

Fig.3 Effective value of current fundamental phasors

如果将经典相量算法得到的电流相量以 50 Hz 的频率传送到 WAMS 数据中心,则 WAMS 监测到的基波相量幅值将是比图 3 更稀疏的采样波形,进一步根据幅值和相位重构信号  $x(n) = X(n)e^{j\varphi(n)}$ ,对重构得到的信号进行频谱分析,结果如图 4 所示。可见,与本文方法计算结果仅含有基波分量相比,经典方法还包含了次同步、超同步及其互补频率分量,但与图 2 相比已经发生较大变化,不再准确。也就是说,采用经典算法在 WAMS 主站可从基波信号中观测到次同步和超同步谐波的存在,但由于相量信息上传到 WAMS 主站的频率有限,导致次(超)同步谐波被衰减或混叠,从而得不到准确的次同步振荡信息,反而影响了工频相量本身的精度。

与单一基波和间谐波检测方法相比<sup>[15-16]</sup>,本文

方法在计算量和计算时间上均有所增加,但由于其检测的间谐波数量具有不确定性和多重性,因此增加一定的计算量和计算时间也是必要的,考虑到现有设备的硬件与软件资源,在工业装置中实现本文方法并不会带来明显的成本增加。

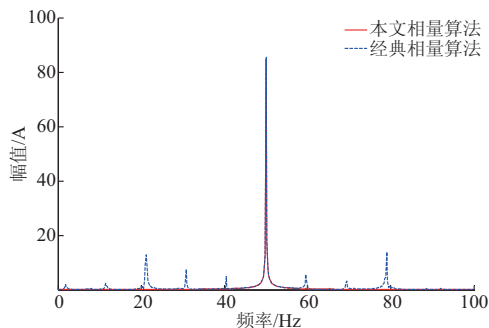


图4 WAMS主站观测到基波相量频谱  
Fig.4 Spectrum of fundamental phasors observed at WAMS center

## 4 结语

本文针对电网次同步振荡问题提出了一种可同时高精度检测基波和多个次(超)同步谐波相量的新方法,与经典的基波相量检测方法相比,其主要改进在于增加了自适应频率检测、模式滤波与相量补偿环节,从而可对多个关注的基波或谐波相量进行精确检测,工程上在适当增加PMU计算资源的基础上可实时计算。仿真信号测试表明,对于平稳信号检测算法的频率精度达到0.01 Hz,幅值精度达到1%,相位精度约为 $1^\circ$ ,能有效抑制白噪声和整次谐波的影响。将算法应用于实测的山北线电流,可检测出其多个次(超)同步谐波和基波相量,充分说明了方法的有效性。但方法在振荡频率变化大和快时的动态响应特性,尚待于进一步研究或改进。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 王亮,谢小荣,姜齐荣,等.大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制[J].电力系统自动化,2014,38(22):26-31.DOI:10.7500/AEPS20131010016.  
WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 26-31. DOI: 10.7500/AEPS20131010016.
- [2] 李建,谢小荣,韩英铎.同步相量测量的若干关键问题[J].电力系统自动化,2005,29(1):45-48.  
LI Jian, XIE Xiaorong, HAN Yingduo. Some key issues of synchrophasor measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 45-48.
- [3] MARTIN K. Phasor measurement unit performance tests [C]// Precise Measurements in Power Systems Conference, November, 1995.
- [4] LI Jian, XIE Xiaorong, XIAO Jinyu, et al. The framework and algorithm of a new phasor measurement unit [C]// IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004), April 5-8, 2004: 826-831.
- [5] 谢小荣,李红军,吴京涛,等.同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J].电网技术,2004,28(1):10-14.  
XIE Xiaorong, LI Hongjun, WU Jingtiao, et al. Feasibility study on using synchrophasor technology for power system transient stability control [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 10-14.
- [6] 江道灼,孙伟华,陈素素.电网相量实时同步测量的一种新方法[J].电力系统自动化,2003,27(15):40-44.  
JIANG Daozhuo, SUN Weihua, CHEN Susu. A new method of real time and synchronous measurement on power network phase parameters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 40-44.
- [7] 闵勇,丁仁杰,韩英铎,等.自适应调整采样率的相量在线测量算法研究[J].电力系统自动化,1998,22(10):10-13.  
MIN Yong, DING Renjie, HAN Yingduo, et al. Research on a new on-line phasor measurement approach based on the adaptive sampling interval technique [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 10-13.
- [8] 刘灏,毕天姝,杨奇逊.数字滤波器对PMU动态行为的影响[J].中国电机工程学报,2012,32(19):49-57.  
LIU Hao, BI Tianshu, YANG Qixun. The impact of digital filter on the PMU dynamic performance [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 49-57.
- [9] 毕天姝,刘灏,吴京涛,等.PMU电压幅值与频率量测一致性的在线评估方法[J].电力系统自动化,2010,34(21):21-26.  
BI Tianshu, LIU Hao, WU Jingtiao, et al. On-line assessment on voltage consistency and frequency consistency of PMU measurement under steady state [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 21-26.
- [10] 张胜.同步相量测量标准化的有关问题讨论[J].电力系统自动化,2007,31(2):91-93.  
ZHANG Sheng. Discussion on synchrophasor measurement standardization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 91-93.
- [11] 毕天姝,刘灏,杨奇逊.PMU算法动态性能及其测试系统[J].电力系统自动化,2014,38(1):62-67.DOI:10.7500/AEPS20130410001.  
BI Tianshu, LIU Hao, YANG Qixun. Dynamic performance of PMU algorithm and its testing system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 62-67. DOI: 10.7500/AEPS20130410001.
- [12] 胡广书.数字信号处理——理论与算法实现[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [13] 全国电力系统管理及其信息交换标准化技术委员会.电力系统实时动态监测系统:GB/T 26865.1—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.

- [14] 谢小荣,刘华坤.次同步和超同步谐波相量的测量方法及测量装置;中国,201510607025.2[P].2015-09-22.
- [15] 熊杰锋,李群,袁晓东,等.电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J].电力系统自动化,2013,37(11):125-133.  
XIONG Jiefeng, LI Qun, YUAN Xiaodong, et al. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 125-133.
- [16] 曹健,林涛,张蔓,等.电力系统间谐波检测方法[J].高电压技术,2008,34(8):1745-1750.  
CAO Jian, LIN Tao, ZHANG Man, et al. Monitoring method of power system interharmonics [J]. High Voltage

Engineering, 2008, 34(8): 1745-1750.

谢小荣(1975—),男,副教授,主要研究方向:电力系统次同步振荡的分析与控制。E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

王 银(1989—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:高压输电线路保护与控制、电力系统次同步振荡。E-mail: wangyin512619@126.com

刘华坤(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统次同步振荡的分析与抑制。E-mail: goodliuhuakun@163.com

(编辑 孔丽蓓)

## Detection Method for Sub-synchronous and Super-synchronous Harmonic Phasors in Power System

XIE Xiaorong<sup>1</sup>, WANG Yin<sup>2</sup>, LIU Huakun<sup>1</sup>, HE Jingbo<sup>3</sup>, XU Zhenyu<sup>4</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Changzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Changzhou 213004, China;

3. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China;

4. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The existing phasor measurement unit (PMU) is based on fundamental synchrophasor technology and cannot meet the emerging requirements on monitoring sub-synchronous /super-synchronous harmonics. To address this issue, a new method is proposed to track sub-synchronous/super-synchronous and fundamental phasors that has improved the existing fixed-interval-sampling phasor correction algorithm. By using adaptive frequency detection, multi-modal filtering and phasor correction, the method can work out both sub-synchronous /super-synchronous harmonic and fundamental phasors precisely for a signal containing multiple non-inter harmonics with constantly changing frequencies. The principle and implementation of the method are presented, and its accuracy and anti-noise ability have been verified with test signals as well as field measured data of an actual system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51322701) and State Grid Corporation of China (No. SGXJ0000KXJS1500670).

**Key words:** sub-synchronous oscillation; sub-synchronous resonance; phasor correction algorithm; dynamic monitoring