

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200275

# 基于矩阵束和奇异值分解的间谐波检测算法

陶 顺, 郭 傲, 刘云博, 要海江

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 目前, 电力系统中频率邻近的间谐波和含有暂态扰动的信号中的间谐波难以准确检测。针对上述两类间谐波成分, 首先, 采用矩阵束算法在噪声情况下对含有邻近间谐波的稳态信号进行检测。其次, 对于含有暂态扰动的信号中的间谐波, 提出了奇异值分解(SVD)和矩阵束算法相结合的检测方法。该方法运用 SVD 精准定位信号发生突变的时刻, 将含暂态扰动的信号分解为多段平稳信号后利用矩阵束算法计算模态参数。通过对 Matlab 仿真数据和风机次同步振荡仿真信号的检测对上述方法的准确性进行了验证。进一步检测了某风电场双馈风机输出功率变化时定子电流中的谐波、间谐波参数, 其结果与理论分析相符合, 具有较强的实用性。

**关键词:** 矩阵束; 间谐波; 噪声; 暂态扰动

## Interharmonic detection algorithm based on a matrix pencil and singular value decomposition

TAO Shun, GUO Ao, LIU Yunbo, YAO Haijiang

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** At present, it is difficult to accurately detect interharmonics at an adjacent frequency and in signals with transient disturbances in a power system. For the above two types of interharmonic components, first, a matrix pencil algorithm is used to detect the steady-state signal with adjacent interharmonics in noise. Secondly, for the interharmonics in the transient disturbances signal, the Singular Value Decomposition (SVD) and matrix beam algorithm combined detection method is proposed. This uses SVD to accurately locate the moment when the signal is abrupt, decomposes the transient disturbance signal into multi-segment stationary signals and then uses the matrix pencil algorithm to calculate the modal parameters. The accuracy of the above method is verified by the detection of Matlab simulation data and the sub-synchronous oscillation simulation signal of the fan. The method is used to detect the harmonics and interharmonics in the stator current when the output power of a wind farm double-fed fan is changed. The results are consistent with the theoretical analysis and the methods have strong practicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777066).

**Key words:** matrix pencil; interharmonics; noise; transient disturbances

## 0 引言

近年来, 随着电力电子器件及其控制技术大规模应用于新能源发电及负荷控制, 大量间谐波被注入电网, 可能会引起次同步振荡和高频谐振等问题<sup>[1-6]</sup>, 危及电网安全运行。文献[7-8]指出不同的风速波动频率会因定转子的耦合在定子基波电流附近产生相应不同频率的间谐波; 文献[8-9]提出风速、光照波动造成的功率振荡会引起变流器直流电压的

扰动, 扰动分量通过变流器开关函数的调制, 在电网侧基波或谐波附近产生邻近的间谐波。此外, 随着轧钢机、风力发电机等重型设备运行工况的频繁切换, 或者电网中出现暂降、暂升、振荡、中断等电能质量事件时, 电力系统中产生的含有暂态扰动的电压/电流中也存在大量间谐波<sup>[10-12]</sup>。精确检测频率邻近的间谐波和含暂态扰动的信号中的间谐波参数对提高电能质量水平和系统稳定运行意义重大。

目前, 针对邻近间谐波参数的检测, 文献[13-14]分别利用消除负频率和分量频谱叠加的方法检测基波两侧附近的间谐波参数, 但均未涉及非基波区

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51777066)

域的邻近间谐波检测。文献[15-16]通过分离谐波与间谐波信号,可检测谐波附近的间谐波参数,但无法检测到多个邻近的间谐波分量。文献[17]利用细化频谱法分离相隔较近的间谐波分量,但细化过程需要较长的采样数据。文献[18]提出的加窗插值法可以检测频率相隔较远的间谐波成分的参数,但仍未解决对于邻近间谐波的检测问题。文献[19-20]中分别提出基于 Prony 的改进算法与 TLS-ESPRIT 法可测得邻近间谐波信号,但抗噪性能差。

另一方面,对含有暂态扰动的信号中的间谐波检测常用的方法有小波变换法、短时傅里叶算法(STFT)和希尔伯特-黄算法(HHT)。文献[21]中的小波变换法可以通过变分辨率分析不同频段的分量,但是小波基函数的选择对结果精度影响较大。STFT 算法检测间谐波所需要的窗口长度为固定值,不能准确得到频率发生变化的时刻,且存在能量泄漏问题,会导致幅值误差偏大。HHT 方法基于经验模态分解,缺少严格的理论推导,存在模态混叠和端点效应问题,不能分离频率相近的频谱分量<sup>[22-23]</sup>。因此,对含暂态扰动的信号中的间谐波精确检测的方法仍有待研究。

下文针对稳态信号中的邻近间谐波以及含暂态扰动的信号中的间谐波分量,分别提出了利用矩阵束算法和 SVD-矩阵束的方法进行精确检测。通过对 Matlab 仿真数据和风机次同步振荡仿真信号的检测,验证了所提方法的准确性;并利用上述方法分析了某风电场双馈风机输出功率变化时定子电流中的谐波、间谐波参数,其计算结果与理论分析所得频率点、幅值变化趋势一致。

## 1 矩阵束算法原理

矩阵束算法通过构造 Hankel 矩阵、奇异值分解和最小二乘等步骤,可在较短时间窗内得到高精度的密集频谱信号的参数<sup>[24-25]</sup>。

电力系统中的电压或电流可以看作由  $M$  个余弦分量和噪声信号组成,表达式为

$$y(t) = \sum_{i=1}^M A_i e^{\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) + n(t) \quad (1)$$

式中:  $M$  为余弦分量的个数;  $A_i$  为幅值;  $\alpha_i$  为衰减因子;  $f_i$  为频率;  $\theta_i$  为相位;  $n(t)$  为噪声信号。对式(1)进行欧拉变换并简化后得到离散采样信号如式(2)所示。

$$y(k\Delta t) = \sum_{i=1}^M p_i z_i^{k\Delta t} \quad (2)$$

式中:  $0 \leq k \leq N-1$ ,  $N$  为信号  $y(t)$  的采样点数;

$p_i = A_i e^{j\theta_i}$  代表采样信号的留数信息;  $z_i = e^{(\alpha_i + j\omega_i)}$  表示极点信息,其中  $\omega_i = 2\pi f_i$  为角频率。

通过采样数据  $y(k\Delta t)$  可构造出如式(3)所示的 Hankel 矩阵  $\mathbf{Y}$ 。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (3)$$

将  $\mathbf{Y}$  分解为如式(4)、式(5)所示的 2 个  $(N-L) \times L$  的 Hankel 矩阵  $\mathbf{Y}_1$  和  $\mathbf{Y}_2$ 。

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L-1) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-2) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (5)$$

文献[26]提出选择适当的  $L$  可消除数据的部分噪声,  $L$  通常取值范围在  $N/4 \sim N/3$  之间,进而  $\mathbf{Y}_1$  和  $\mathbf{Y}_2$  可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{P} \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Y}_2 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{P} \mathbf{Z}_0 \mathbf{Z}_2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中:

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-L-1} & z_2^{N-L-1} & \cdots & z_M^{N-L-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \cdots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \cdots & z_2^{L-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & z_M & \cdots & z_M^{L-1} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{Z}_0 = \text{diag}[z_1, z_2, \dots, z_M]$ ,  $\mathbf{P} = \text{diag}[p_1, p_2, \dots, p_M]$ , 定义矩阵束

$$\mathbf{Y}_2 - \lambda \mathbf{Y}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{P} (\mathbf{Z}_0 - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{Z}_2 \quad (7)$$

矩阵  $\mathbf{Y}_2 - \lambda \mathbf{Y}_1$  的秩为  $M$ , 并且当  $\lambda = z_i$  时,  $(\mathbf{Z}_0 - \lambda \mathbf{I})$  的第  $i$  行全部为零,矩阵的秩降为  $M-1$ 。信号的极点即为矩阵束  $\{\mathbf{Y}_2, \mathbf{Y}_1\}$  的广义特征值,故而

对上述极点信息的求取转化为求解式(8)特征值的过程。

$$\mathbf{G} = \mathbf{Y}_1^+ \mathbf{Y}_2 = \{\mathbf{Y}_1^H \mathbf{Y}_1\}^{-1} \mathbf{Y}_1^H \mathbf{Y}_2 \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{Y}_1^+$  是  $\mathbf{Y}_1$  的伪逆矩阵;  $\mathbf{Y}_1^H$  是  $\mathbf{Y}_1$  的共轭转置阵。

文献[27]提出为降低噪声对信号极点参数计算精度的影响, 可通过对  $\mathbf{Y}$  进行奇异值分解并滤除较小奇异值达到滤波效果, 利用其方法得到极点  $z_i$  后, 系数  $p_i$  可通过式(9)所示的最小二乘法计算得到。

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(10), 可求解得到信号中各模式分量的幅值、相位、角频率以及衰减因子。

$$\begin{cases} A_i = |p_i| \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(p_i)/\text{Re}(p_i)] \\ \omega_i = \arctan[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)]/\Delta t \\ \sigma_i = \ln|z_i|/\Delta t \end{cases} \quad (10)$$

## 2 基于 SVD 的信号突变时刻定位

在电力系统发生电能质量事件或新能源、负荷工况发生变化时, 会出现含有暂态扰动的电压/电流信号, 对此类信号中的间谐波进行检测时, 若不能精确定位到突变发生的时刻, 截断窗口中将包含变化前后两部分的数据, 测量结果会出现较大误差。文献[28-29]将 SVD 应用于对电力系统中扰动信号时刻的定位。对于含暂态扰动的电力信号, 为实现对各频率分量参数的精准检测, 可先利用 SVD 定位信号的突变时刻。对于利用采样数据构成的  $(N-L) \times (L+1)$  阶 Hankel 矩阵  $\mathbf{Y}$  (如式(3)所示), 存在正交矩阵  $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_{(N-L)}) \in \mathbf{R}^{(N-L) \times (N-L)}$ 、 $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_{(L+1)}) \in \mathbf{R}^{(L+1) \times (L+1)}$ , 使式(11)成立, 即对  $\mathbf{Y}$  进行奇异值分解。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^H \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{S} = (\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i), 0)^T$ ,  $\sigma_i$  为矩阵  $\mathbf{Y}$  的奇异值, 且  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_i > 0$ 。

为实现对采样信号的分解, 可将式(11)用列向量表示为

$$\mathbf{Y} = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_i u_i v_i^T \quad (12)$$

式中:  $u_i \in \mathbf{R}^{(N-L) \times 1}$ ;  $v_i \in \mathbf{R}^{(L+1) \times 1}$ 。令

$$\mathbf{Y}^{(i)} = \sigma_i u_i v_i^T \quad (13)$$

由式(13)可得采样序列的各层分量, 即实现了对信号的线性分解, 第  $i$  层分量构成的  $\mathbf{Y}^{(i)}$  如式(14)所示, 通常第三层分量在信号的突变时刻有明显变化, 可用于定位信号突变时刻。

$$\mathbf{Y}^{(i)} = \begin{bmatrix} y_i(1) & y_i(2) & \cdots & y_i(n) \\ y_i(2) & y_i(3) & \cdots & y_i(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_i(N-n+1) & y_i(N-n+2) & \cdots & y_i(N) \end{bmatrix} \quad (14)$$

## 3 对噪声环境下邻近间谐波的检测

为了验证矩阵束算法具有优良的频谱分辨能力与抗噪性能, 本节构造了一个如式(15)所示的含有邻近间谐波的测试信号, 其中含有基波附近的 48 Hz 分量, 两个邻近的 74 Hz、76 Hz 间谐波分量。设定采样频率为 5 000 Hz, 窗口长度为 2 000。选取具有高频谱分辨能力的 TLS-ESPRIT 方法做对比, 在无噪声环境下, TLS-ESPRIT 法与矩阵束法的各参数误差均小于  $10^{-10}$ ; 但在信噪比(SNR)分别为 20 dB、30 dB、40 dB 时, TLS-ESPRIT 法无法检测到各分量, 矩阵束法检测误差分别如表 1、表 2 和表 3 所示。

$$\begin{aligned} x(t) = & 10 \times \cos\left(2\pi \times 48t + \frac{\pi}{2}\right) + 100 \times \cos(2\pi \times 50t) + \\ & \cdots + 10 \times \cos\left(2\pi \times 74t + \frac{\pi}{3}\right) + 10 \times \cos\left(2\pi \times 76t + \frac{\pi}{3}\right) + \\ & \cdots + 30 \times \cos\left(2\pi \times 100t + \frac{\pi}{2}\right) + 20 \times \cos\left(2\pi \times 150t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

通过以上检测结果可知, 在噪声环境下, 频率、相位均有较高精度。在  $SNR=20$  dB 时, 74 Hz、76 Hz 分量的幅值误差超过 10%;  $SNR=40$  dB 时, 各分量幅值误差均小于 1%。故在信噪比高于 40 dB 时, 矩阵束算法可有效检测信号中邻近频率的间谐波参数。

表 1  $SNR=20$  dB 时矩阵束法检测结果误差

Table 1 Detection error of matrix pencil method when the SNR is 20 dB

设定频率/Hz	频率/Hz	幅值/%	相位/rad
48	0.053 6	-1.972 0	-0.102 6
50	0.000 9	-0.723 0	0.004 6
74	0.016 8	-10.562 0	0.040 6
76	0.067 5	-12.102 0	-0.022 4
100	0.002 3	0.338 3	-0.010 9
150	0.003 9	0.895 5	-0.001 9

表 2 SNR=30 dB 时矩阵束法检测结果误差

Table 2 Detection error of matrix pencil method when the SNR is 30 dB

设定频率/Hz	频率/Hz	幅值/%	相位/rad
48	-0.023 2	-5.642 0	-0.012 8
50	-0.004 5	0.359 0	0.003 5
74	0.017 5	1.854	-0.031 4
76	-0.032 7	0.262	0.045 1
100	-0.000 4	-0.191 7	-0.000 3
150	-0.002 4	0.040 0	-0.002 0

表 3 SNR=40 dB 时矩阵束法检测结果误差

Table 3 Detection error of matrix pencil method when the SNR is 40 dB

设定频率/Hz	频率/Hz	幅值/%	相位/rad
48	0.000 9	0.951 0	-0.069
50	0.000 8	-0.086	0.001 3
74	0.004 2	0.724 0	-0.002 7
76	-0.001 2	0.669 0	0.005 3
100	-0.000 7	0.068 0	-0.001 4
150	-0.000 6	0.131 0	-0.000 4

#### 4 对含有暂态扰动的信号中间谐波的检测

本节先利用 SVD 定位到信号发生突变的时刻，将含暂态扰动的信号分解为多段平稳信号，再运用滑窗矩阵束法对每段数据进行分析。

##### 4.1 Matlab 仿真数据检测

为验证算法的准确性，构造了如式(16)所示含扰动的信号，加入 40 dB 噪声，其时域波形如图 1 所示。采样频率为 5 000 Hz，滑窗矩阵束法的窗口长度设定为 2 000，每次计算时窗口向前移动 100 个数据长度，并用加汉宁窗的短时傅里叶方法做了对比。

$$f(t) = \begin{cases} 50 \times \cos(2\pi \times 50t) + 20 \times \cos(2\pi \times 100t) + \\ 12 \times \cos\left(2\pi \times 25t + \frac{\pi}{3}\right), & (0 \leq t < 1 \text{ s}) \\ 50 \times \cos(2\pi \times 50t) + 500e^{-0.5t} \cos(2\pi \times 165t), & (1 \text{ s} \leq t < 2 \text{ s}) \\ 50 \times \cos(2\pi \times 50t) + 20 \times \cos\left(2\pi \times 200t + \frac{\pi}{3}\right), & (2 \text{ s} \leq t < 3 \text{ s}) \end{cases} \quad (16)$$

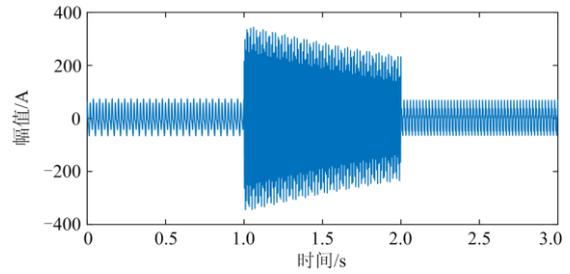


图 1 仿真信号时域波形

Fig. 1 Time domain waveform of the simulated signal

图 2 给出了仿真信号的 STFT 时频分析结果。从图 2 中可以看出，STFT 方法得到的时频分析结果中存在以 25 Hz、50 Hz、100 Hz、165 Hz、200 Hz 为中心的频带簇，各频带范围较宽，即能量发生了泄漏，幅值计算误差大；此外，STFT 方法不能精确定位到信号发生突变的时刻，只能看出信号在 1 s、2 s 附近发生了突变。图 3 给出了仿真信号的 SVD 定位结果，从图 3 中可以看出，利用 SVD 方法，定位到信号在第 1 s 和第 2 s 处发生突变，将信号分为三部分。图 4 给出了基于 SVD-矩阵束的时频分析结果，频率误差小于 0.01 Hz，幅值误差在 0.05 A 以内，精度较高。

##### 4.2 风机次同步间谐波振荡仿真波形信号检测

为了验证该方法在电压/电流出现较大扰动时能准确检测间谐波参数，搭建了次同步振荡状态下的直驱风机仿真模型且使其风机出力多次变化，图 5 给出了并网节点电流的时域波形。额定功率为 1.5 MW 的单台直驱风机并网运行，风机 0~1 s 初始功率为 0.577 MW，电流波形平稳；在第 1 s 时输出功率降低为 0.228 MW，电流振荡收敛；在第 2 s 时功率变为 0.072 MW，振荡发散；第 3 s 功率变为 0.240 MW，振荡收敛。利用 SVD-矩阵束法对此电流信号进行时频分析，采样及窗口参数同 4.1 节。

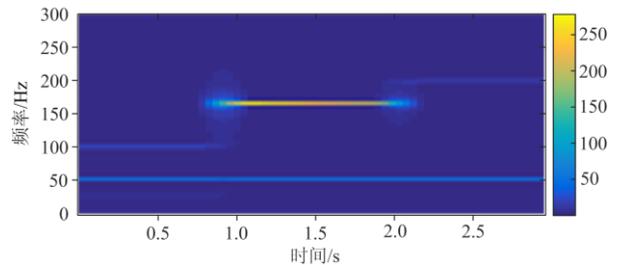


图 2 仿真信号的 STFT 时频分析结果

Fig. 2 STFT time-frequency analysis results of the simulated signal

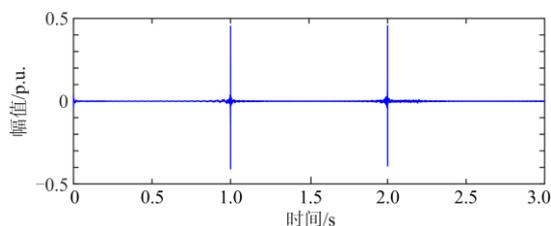


图 3 仿真信号的 SVD 定位结果

Fig. 3 SVD positioning results of the simulated signal

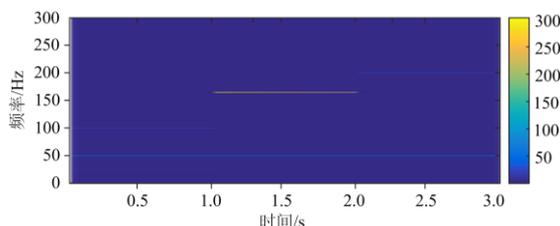


图 4 仿真信号的 SVD-矩阵束时频分析结果

Fig. 4 SVD-matrix pencil time-frequency analysis results of the simulated signal

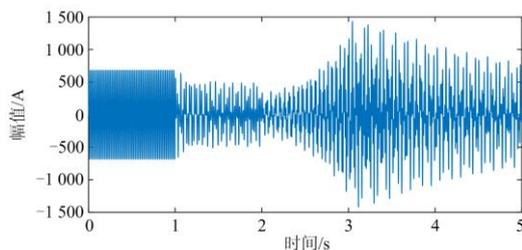


图 5 次同步间谐波振荡时并网节点电流波形

Fig. 5 Current waveform of the grid connection point during interharmonic oscillation between sub-synchronization

图 6 给出了基于 SVD 的信号突变时刻定位结果, 得到电流信号在第 1 s、2 s、3 s 时发生了突变, 可将此信号分为 4 段进行间谐波检测。图 7 给出了基于 SVD-矩阵束法的电流信号时频分析结果, 表 5 给出了各时间段内频率、幅值的变化范围。分析结果表明, 系统在 1~5 s 的各时段内均检测到关于 50 Hz 精确对称的两个频率带, 符合次同步振荡的基本频率特性, 证明了该算法的准确性。

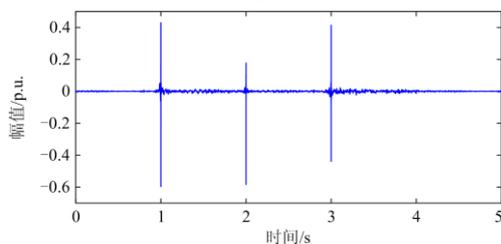


图 6 次同步间谐波振荡信号 SVD 定位结果

Fig. 6 SVD positioning results of interharmonic oscillation between sub-synchronization

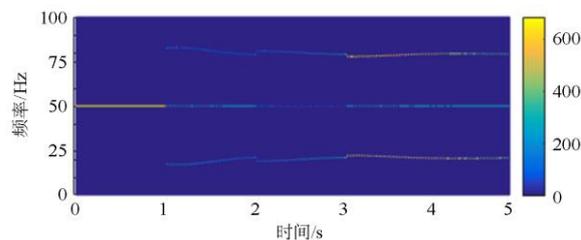


图 7 次同步间谐波振荡过程的 SVD-矩阵束时频分析结果

Fig. 7 SVD-matrix pencil time-frequency analysis results during interharmonic oscillation between sub-synchronization

表 5 次同步间谐波振荡过程频率、幅值变化范围

Table 5 Frequency and amplitude variation range during interharmonic oscillation between sub-synchronization

时间段/s	频率范围/Hz	幅值范围/A
0~1	50	682.8
1~2	17.12~21.27	208.4~95.6
	49.98~50.06	324~240.8
2~3	82.88~78.73	136.6~92.8
	19.13~20.98	142~313.2
3~5	50.05~49.45	87.4~24.8
	80.86~79.02	110.4~281.2
	22.2~20.6	563~320.8
	49.97~50.01	251~312.8
	77.8~79.4	660.8~288.8

#### 4.3 实际风电场录波数据检测

为验证该方法在电压/电流出现较小波动时能准确检测间谐波参数, 选取双馈风机定子电流这一代表性信号进行检测, 其间谐波频率、幅值都会随功率、转速的改变产生相应的变化。对山西某风电场 2 MW 双馈风机定子的实测电流进行了分析。采样频率为 10 000 Hz, 滑窗矩阵束法的窗口长度设定为 4 000, 每次计算时窗口向前移动 200 个数据长度。由于录波时间较长, 在图 8 中只给出了功率变化时刻附近的定子电流波形图。该机组在(0~ $t_1$ ) s、( $t_1$ ~ $t_2$ ) s、( $t_2$ ~ $t_3$ ) s 的输出功率分别为 1 200 kW、1 480 kW、1 800 kW。利用所提方法, 图 9 中给出了信号突变时刻定位的结果, 可见该电流信号在第

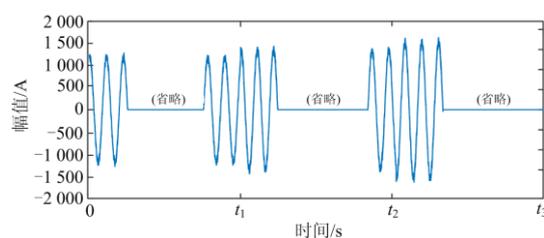


图 8 风电场定子电流实录波形

Fig. 8 Recorded waveform of wind farm stator current

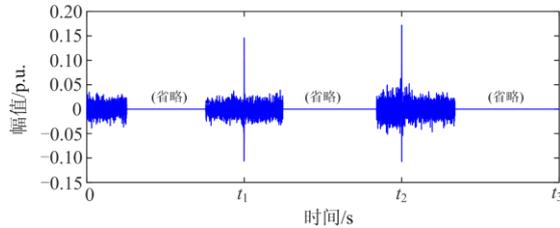


图9 风电场定子电流 SVD 定位结果

Fig. 9 SVD positioning results of wind farm stator current

$t_1$  秒、第  $t_2$  秒时发生了变化, 将此信号分为 3 段平稳信号运用滑窗矩阵束算法分析。

由于频率分量范围广, 且各参数变化范围极小, 在时频图中不易清晰显示, 故只给出了各时段幅值最大 6 个分量的频率中位值和幅值的平均值, 如表 6 所示。

表 6 各时间段内风电场定子电流频率、幅值

Table 6 Frequency and amplitude variation range in each time period of wind farm stator current

时间段/s					
0~ $t_1$		$t_1$ ~ $t_2$		$t_2$ ~ $t_3$	
频率/Hz	幅值/A	频率/Hz	幅值/A	频率/Hz	幅值/A
50.03	1190	50.03	1381	49.98	1 607.8
58.77	10.58	59.13	8.8	59.14	7.66
1 923	9.8	1 922	9.7	1 923	8.3
2 077	10.48	2 078	9.46	2 077	8.58
3 950	25.96	3 950	28.72	3 950	28.92
4 050	26.5	4 050	28.32	4 050	28.88

进一步分析表 6 中测量所得频率点, 除去 50 Hz 附近的基波外, 主要有以下三类成分:

1) 频率在转子侧变流器一倍载波频率附近的 2 077 Hz(2 078 Hz) 和 1 923 Hz(1 922 Hz) 的间谐波分量, 其频率与按文献[30]在参数  $m=1$ 、 $n=\pm 2$  下的定子间谐波计算结果一致。当发电机输出功率升高时, 转子电流增加, 电压调制比相应减小, 按照文献[31]中对 SVPWM 调制相关计算公式, 其电压幅值减小, 进而引起电流幅值减小。测量结果符合理论分析。

2) 频率在转子侧变流器二倍载波频率附近的 3 950 Hz 和 4 050 Hz 的谐波分量, 其频率符合文献[30]中参数  $m=2$ 、 $n=\pm 1$  的情况。发电机输出功率升高时, 按照文献[31]中对 SVPWM 调制相关计算公式, 该谐波幅值增大。测量结果符合理论分析。

3) 频率在 59 Hz 附近的分量是由定转子磁场关系产生的间谐波量, 类似的还有因幅值较小未在表 6 中列出的 109 Hz 及转子电流中 159 Hz 的间谐波分量, 其幅值变化情况与发电机内部磁场变化相关, 有待进一步讨论。

综上, 通过运用 SVD-矩阵束算法对风电场实测数据的分析, 进一步验证了其准确性与实用性。

## 5 结论

针对电力系统中频率邻近的间谐波和含暂态扰动的信号中的间谐波难以准确检测这一问题, 本文结合实际应用情况, 提出采用矩阵束算法对含有邻近间谐波的稳态信号进行检测, 经验证, 在信噪比高于 40 dB 的环境下能准确得到频率邻近的间谐波参数。进一步提出基于 SVD-矩阵束法检测含暂态扰动的信号中的间谐波分量, 并通过 Matlab 仿真数据和风机次同步振荡仿真信号的检测, 验证了所提方法的准确性。在此基础上, 利用此方法分析了某风电场双馈风机输出功率变化时定子电流中的谐波、间谐波参数, 其结果与理论分析相符合, 证明了此方法具有较强的实用性。但在研究过程中发现, 矩阵束算法采用的数据窗口长度与频率分辨率、频谱丰富度的具体数量关系有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] QU Wenhui, YU Zuo, ZHAO Qian. Subsynchronous oscillation and its practical mitigation project at the Hulun Buir power plant generating for a Chinese extra-high-voltage AC and DC hybrid transmission network[J]. *Transmission & Distribution*, 2016, 10(4): 949-954.
- [2] 孙昕炜, 史华勃, 倪江. 弱联系电网中 SVC 引起的次同步振荡分析及其抑制措施研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(21): 171-178.  
SUN Xinwei, SHI Huabo, NI Jiang. Study of the subsynchronous oscillation caused by SVC in weak-link power grids and its suppressing method[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(21): 171-178.
- [3] 杨迪瑞, 杨文焕, 李荣高. 双 PWM 交流调速系统耦合调制建模及其注入电网间谐波电流特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(3): 869-880.  
YANG Dirui, YANG Wenhuan, LI Ronggao. Modeling for coupling modulation in dual PWM speed control systems and characteristic analysis of interharmonic currents injected into distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(3): 869-880.
- [4] 年珩, 庞博, 许国东, 等. 应对并补电网下 DFIG 系统高频谐振的宽频阻抗重塑策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(18): 48-58.  
NIAN Heng, PANG Bo, XU Guodong, et al. Reshaping strategy of wide frequency impedance for DFIG system to suppress high frequency resonance under parallel compensation grid[J]. *Automation of Electric Power*

- Systems, 2018, 42(18): 48-58.
- [5] 张金平, 李建立, 段晨. 计及负频率影响的新能源发电低频间谐波检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 95-100.  
ZHANG Jinping, LI Jianli, DUAN Chen. Low frequency interharmonic detection method for renewable energy generation with negative frequency contribution[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 95-100.
- [6] 方力, 潘学萍, 鞠平. SVC 对双馈风电场次同步振荡影响及抑制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 52-58.  
FANG Li, PAN Xueping, JU Ping. Impact of SVC on sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farms and suppression strategy[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 52-58.
- [7] DJUROVIĆ S, VILCHIS-RODRIGUEZ D S, SMITH A C. Supply induced interharmonic effects in wound rotor and doubly-fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1397-1408.
- [8] 王兴亮, 姚钢, 周荔丹, 等. 基于 DFIG 风电场功率振荡的成因分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(7): 97-104.  
WANG Xingliang, YAO Gang, ZHOU Lidan, et al. Analysis of causes of oscillation in the wind farm system based on DFIG[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(7): 97-104.
- [9] 陶顺, 姚黎婷, 廖坤玉, 等. 光伏逆变器直流电压扰动引起的间谐波电流解析模型[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 878-885.  
TAO Shun, YAO Liting, LIAO Kunyu, et al. Analytical model for interharmonic current caused by DC voltage disturbance of photovoltaic inverter[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 878-885.
- [10] 廖坤玉, 陶顺, 姚黎婷, 等. RSC 扰动分量与转差频率耦合引起的 DFIG 定子间谐波电流解析模型[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1076-1083.  
LIAO Kunyu, TAO Shun, YAO Liting, et al. Analytical model for DFIG stator inter harmonic current induced by coupling of RSC disturbance components and slip frequency[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1076-1083.
- [11] 方昕玥, 王斌, 喻敏, 等. 交流电弧炉的间谐波检测及状态判断[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 137-143.  
FANG Xinyue, WANG Bin, YU Min, et al. Inter-harmonic detection and state judgment of AC arc furnace[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 137-143.
- [12] 钱峰, 陈艺, 刘俊磊, 等. 大规模风电接入的电力系统协调控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 12-18.  
QIAN Feng, CHEN Yi, LIU Junlei, et al. Coordinated Control Strategy for Power Systems with Large-scale Wind Power Integration[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 12-18.
- [13] 王泽, 杨洪耕, 王佳兴, 等. 消除负频率影响的低频间谐波快速检测方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 140-145.  
WANG Ze, YANG Honggeng, WANG Jiaying, et al. Rapid low frequency interharmonic detection with negative frequency elimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 140-145.
- [14] 段晨, 杨洪耕. 邻近基波/谐波的间谐波检测算法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1818-1825.  
DUAN Chen, YANG Honggeng. An algorithm for detecting inter-harmonics adjacent to fundamental harmonic components[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1818-1825.
- [15] 惠锦, 董晓峰, 张逸. 一种电力系统谐波与间谐波频谱互扰抑制方法研究[J]. 电工电气, 2017(9): 19-23.  
HUI Jin, DONG Xiaofeng, ZHANG Yi. Research on a kind of spectral interruption suppression method for power system harmonic and interharmonic[J]. Electrotechnics Electric, 2017(9): 19-23.
- [16] 孟玲玲, 孙常栋, 韩宝如. 基于最小二乘法和独立分量分析的间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 76-81.  
MENG Lingling, SUN Changdong, HAN Baoru. Algorithm for inter-harmonic detection based on least square method and ICA[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 76-81.
- [17] LÜ Wentao, SHEN Chen, GUI Fan. Real-time spectrum analyzer based on all phase FFT spectrum analysis[C] // 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, June 2013, Qingdao, China: 966-969.
- [18] 华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 9-15.  
HUA Min, CHEN Jianyun. A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 9-15.
- [19] 应俊, 朱云鹏, 贺超. 基于改进的SVD和Prony的谐波检测算法[J]. 电子技术应用, 2019, 45(1): 46-50.  
YING Jun, ZHU Yunpeng, HE Chao. Harmonic detection algorithm based on improved SVD and Prony[J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(1): 46-50.

- [20] 张滨生, 喻乐, 和敬涵, 等. 基于快速 TLS-ESPRIT 的间谐波检测算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 26-31.  
ZHANG Binsheng, YU Le, HE Jinghan, et al. Inter-harmonic detection based on fast TLS-ESPRIT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 26-31.
- [21] 杨名, 陈红卫. 一种基于小波包和 apFFT 的间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 112-117.  
YANG Ming, CHEN Hongwei. A method to detect inter-harmonics based on wavelet packet and apFFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 112-117.
- [22] YEH J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method[J]. Advance in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.
- [23] AFRONI M J, SUTANTO D, STIRLING D. Analysis of nonstationary power-quality waveforms using iterative Hilbert Huang transform and SAX algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 156-162.
- [24] 刘晓建, 李娟, 焦邵华. 奇异熵矩阵束算法及其在次同步振荡模态参数辨识中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 31-36.  
LIU Xiaojian, LI Juan, JIAO Shaohua. Singular entropy matrix pencil method and its application to parameters identification of subsynchronous oscillation modes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(6): 31-36.
- [25] 王宇静, 于继来. 电力系统振荡模态的矩阵束辨识法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 12-17.  
WANG Yujing, YU Jilai. Matrix pencil methods of oscillation modes identification in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 12-17.
- [26] SARKAR T K, PEREIRA O. Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials[J]. IEEE Antennas Propagation Magazine, 1995, 37(2): 48-55.
- [27] 王臻, 李承, 张舜钦, 等. 基于改进矩阵束滤波与检测的异步电动机故障诊断新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 213-219.  
WANG Zhen, LI Cheng, ZHANG Shunqin, et al. A new filter and detection approach of fault in asynchronous motor based on improved matrix pencil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 213-219.
- [28] 张玥, 范伟强, 张琦, 等. 基于 EEMD-ICA 与 SVD 的电网谐波检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(3): 39-43.  
ZHANG Yue, FAN Weiqiang, ZHANG Qi, et al. Harmonic separation from grid voltage with EEMD-ICA and SVD[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(3): 39-43.
- [29] 徐永海, 赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 174-179.  
XU Yonghai, ZHAO Yan. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 174-179.
- [30] 陶顺, 刘云博, 赵蕾, 等. 基于脉宽调制的 DFIG 并网谐波/间谐波幅频特性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 153-167.  
TAO Shun, LIU Yunbo, ZHAO Lei, et al. Amplitude-frequency characteristic analysis of harmonic/inter-harmonic of grid-connected DFIG based on pulse width modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 153-167.
- [31] HOLMES D G, LIPO T A. 电力电子变换器 PWM 技术原理与实践[M]. 周克亮, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-05-05

作者简介:

陶顺(1972—), 女, 副教授, 主要研究方向为智能配电网与电能质量; E-mail: tao\_shun@sina.com

郭傲(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电能质量分析与控制; E-mail: guoaozhy@163.com

刘云博(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电能质量分析与控制. E-mail: liuyb\_mt@163.com

(编辑 魏小丽)