

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191512

基于确定性测量矩阵与变阈值 SAMP 的超高次谐波检测算法

刘建锋, 宋子恒, 周勇良, 孔培

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 随着电网中采用高频电力电子器件制造的设备逐渐增多, 配电网中的超高次谐波现象已经成为了一种亟需解决的新型电能质量问题。相较于传统谐波检测方法采样超高次谐波信号时产生的巨大数据量, 压缩感知作为一种新型信号处理方法, 在使用测量矩阵对稀疏信号进行亚采样后通过重构算法用较少的数据就能精确地恢复原始信号, 有效降低了对采样端硬件的要求。提出了一种基于确定性测量矩阵与变阈值 SAMP 算法的压缩感知超高次谐波检测算法。首先该方法采用了一种由确定性随机序列构造的测量矩阵, 这种确定性测量矩阵的结构与随机测量矩阵相比更易于传输与存储, 同时具有和高斯随机矩阵相同的重构性能。其次, 针对 SAMP 重构算法在频谱泄露时易发生稀疏度过估计的问题, 提出了一种改进的变阈值 SAMP 算法, 设置一个动态的阈值来控制算法中内积的选取, 减少迭代中的误选。改进算法提高了超高次谐波检测的精度, 降低了因频谱泄露和噪声造成的误差且更容易硬件实现。最后, 通过仿真和实测结果证明了改进算法的准确性和有效性。

关键词: 超高次谐波; 压缩感知; 确定性测量矩阵; 变阈值 SAMP 算法

Supraharmonics measurement algorithm based on a deterministic measurement matrix and VT-SAMP

LIU Jianfeng, SONG Ziheng, ZHOU Yongliang, KONG Pei

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the increasing use of high-frequency power electronic devices in power systems, the phenomenon of supraharmonics in distribution networks has become a new type of power quality problem that needs to be solved urgently. Compared with the huge amount of data generated by the traditional harmonic detection method, when sampling supraharmonics signals, compressed sensing is a new type of signal processing method. After using the measurement matrix to sub-sample the sparse signal to be measured, the original signal can be accurately restored with fewer data through the reconstruction algorithm, which effectively reduces the requirements on the sampling hardware. This paper introduces a supraharmonics measurement method based on a deterministic measurement matrix and VT-SAMP. First, the method uses a measurement matrix constructed from a deterministic random sequence. The structure of this deterministic measurement matrix is easier to transmit and store than a random measurement matrix, and it has the same reconstruction performance as a Gaussian random matrix. Second, aiming at the problem of the sparseness overestimation caused by spectrum leakage in the SAMP algorithm, this paper proposes an improved SAMP algorithm with Variable Threshold (VT-SAMP). It sets a dynamic threshold to control the selection of the inner product in the algorithm and reduce mis-selection in iterations. The improved algorithm enhances the accuracy of supraharmonics measurement and reduces the errors caused by spectrum leakage and noise. Finally, the accuracy and effectiveness of the improved algorithm are proved by simulation and actual measurement results.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51807114).

Key words: supraharmonics; compressed sensing; deterministic measurement matrix; SAMP algorithm with variable threshold

0 引言

近年来随着分布式发电在电网中比例不断增加

以及电动汽车的逐渐普及, 电力系统中采用诸如绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)等全控型电力电子器件制造的电气设备越来越多, 例如电动汽车充电桩中的交直流变换装置、光伏逆变器等。这类具有极高开关频率的设备在运行时会产生 2~150 kHz 的超高次谐波^[1](Supraharmonics),

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助
(51807114)

而随着此类新型电气设备越来越多的接入, 超高次谐波所引发的电能质量问题也受到了越来越多的关注, 最典型的就是对配电网电气设备造成如断路器误动^[2], 变流器异常发热^[3]等影响, 文献[4]反映超高次谐波还会导致电力载波通信失败。在这种背景下, 超高次谐波的检测具有重要的意义, 对其生成机理、传播特性以及对超高次谐波的抑制、治理等后续研究提供了条件和依据。

根据 2015 年最新发布的标准 IEC61000-4-30^[5], 对于超高次谐波, 推荐的测量方法主要有两种。第一种方法是将 IEC61000-4-7 中适用于 2~9 kHz 频段的超高次谐波测量方法的上限提高到 150 kHz^[6], 这种方法需要测量设备有足够大的存储空间和较强的数据处理能力, 故实现比较困难。第二种是 IEC61000-4-30 附录 C3 给出的一种 32 等时矩数据窗测量^[7]法, 与第一种相比该方法的计算量更小, 需求的数据量仅为第一种的 8%。不过由于 DFT 时间窗长度与频率分辨率相互制约的固有特性, 该方法也有其局限性。鉴于以上背景, 文献[8]首次将压缩感知引入到超高次谐波的检测中, 利用压缩感知正交匹配追踪算法(CS-orthogonal Matching Pursuit, CS-OMP)实现了超高次谐波的准确识别, 也证明了压缩感知算法在超高次谐波的检测中比 DFT 具有更高的准确性, 但是 OMP 算法需要预知信号的稀疏度, 而在实际中很难得到待测信号的稀疏度, 这在很大程度上限制了该算法的应用。

压缩感知是一种处理稀疏信号的新型方法, 通过测量矩阵将离散的稀疏信号降维后可以直接获得压缩后的信号数据, 再经由特定的重构算法可以从较少的低维信号中精确地恢复出原始信号^[9]。相较于传统奈奎斯特采样方法在谐波检测中产生数据量大、对硬件要求高的缺陷, 压缩感知能有效降低对采样端硬件的要求^[10]。本文基于压缩感知采样重构理论, 提出了一种新型的 CS-VTSAMP 超高次谐波检测算法, 先采用离散傅里叶变换(DFT)向量将连续的时域谐波信号变换为离散稀疏信号后再通过确定性测量矩阵和变阈值 SAMP 算法能够实现对超高次谐波信号的准确压缩与重构。

测量矩阵的性能是决定压缩感知重构质量的关键, 一个好的测量矩阵能在对原始信号降维时保留信号尽可能多的重要信息。目前主要的测量矩阵分为两种, 第一种是以高斯随机矩阵为代表的随机测量矩阵^[11], 这类矩阵在数字仿真中的重构表现通常很好, 但也由于其完全随机性的特点, 需要比较大的存储空间, 所以难以在实际中硬件实现。第二

种是确定性测量矩阵, 这类矩阵由特定的数学方程生成, 所以只需要系统的方程和初始参数就可以完成存储和传输, 更易在硬件上实现。在确定性测量矩阵中, 文献[12]提出了基于多项式的确定性测量矩阵, 但限制了矩阵的行和列必须为 2 的整数次方, 不能自由设置矩阵的大小。文献[13]提出了易于实现的基于混沌序列的测量矩阵, 但混沌序列的特点是至少需要以间隔 15 点采样才能体现随机性和独立性, 因此很大部分数据是弃用的, 浪费了系统资源。针对以上缺陷, 本文在超高次谐波检测算法中结合了一种由确定性随机序列构造而成的测量矩阵, 这种确定性矩阵可以任意设置大小, 并且相比于随机测量矩阵它占用的系统资源更少, 更容易进行硬件实现。仿真结果表明这种矩阵与高斯随机矩阵在同种重构算法下拥有几乎相同的重构精度, 具有优良的重构性能。

压缩感知通过重构算法可以将经过降维的亚采样信号精确地恢复成原始信号, 文献[8]采用了 CS-OMP 算法, 虽然能够实现超高次谐波信号的精确重构, 但是 OMP 算法需要预知信号稀疏度的特性在相当程度上限制了其的应用。稀疏度自适应匹配追踪算法(Sparsity Adaptive MP, SAMP)通过在迭代中采用回溯的思想, 在未知信号稀疏度的情况下也能较好地重构信号。但真实信号难免会受到频谱泄露, 噪声等外在因素的影响, 这种情况下 SAMP 算法在重构过程中可能会因原子预选数超过测量值而出现误选, 迭代时发生稀疏度过估计^[14], 最后导致重构准确率降低甚至重构失败。鉴于以上两点, 本文提出了改进的变阈值 SAMP 超高次谐波重构算法, 设定了动态的阈值上限来控制迭代中原子选取的个数。仿真结果表明与 SAMP 算法相比, 它在频谱泄露和加噪的情况下具有更好的重构性能, 稳定性和抗干扰性更优异。

1 压缩感知的基本理论

压缩感知理论提出: 设长度为 N 的信号 x 自身是稀疏的或者可在某种变化域下稀疏。设其稀疏度为 K , 那么通过一个和稀疏基不相关的测量矩阵可以将原始信号从高维投影到低维, 得到一组远小于原始信号长度的 M 维亚采样观测信号 $y(M < N)$, 两者之间的关系为

$$y = \Phi x \quad (1)$$

式中, Φ 为 $M \times N$ 的测量矩阵。实际中很少有在时域内稀疏的信号, 所以常用稀疏基 Ψ 将原始信号 x 稀疏表示如式(2)。

$$x = \Psi\theta \quad (2)$$

式中: θ 即为是 y 的稀疏表示; Ψ 为 $N \times N$ 的正交稀疏表示基(常采用 DFT、DCT、DWT 等)。把式(2)代入式(1), 得到:

$$y = \Phi x = \Phi\Psi\theta = \Theta\theta \quad (3)$$

常把式(3)中 $M \times N$ 维矩阵 $\Theta = \Phi\Psi$ 称为感知矩阵。E.Candes 以及 T. Tao 证明在在测量矩阵 Φ 满足一定条件, 即有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)^[15]时, 可以通过相应的重构算法从少量的观测值 y 中精确地重构出原始信号^[16]。

2 基于确定性随机序列的测量矩阵

在 $M \geq cK \lg(N/K)$ 时, 高斯测量矩阵和伯努利测量矩阵等随机测量矩阵能以极大概率满足 RIP^[17], 但与确定性测量矩阵相比, 随机测量矩阵占用内存多、计算复杂度高的缺陷让其难以大规模硬件实现。

2.1 确定性随机序列及其特性

对于 Logistic 映射的显函数式(4)。

$$x_n = P(\theta T z^n) \quad (4)$$

其中: $P(t)$ 为周期函数; T 为 $P(t)$ 的周期; θ 和 z 为实数。当 $z = p/q$ 为互质假分数时, 即使已知式(4)产生序列的 $m+1$ 个值 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_m$, 序列的下一个值 x_{m+1} 仍然有 q 种取值的可能^[18]。这种具有多值对应关系的序列由确定的数学结构生成, 同时序列本身还具有一定的随机性, 所以称之为确定性随机序列。考虑如下线性映射:

$$f(a, t) = \text{mod}(at, 1) \quad (5)$$

其中, mod 为取余运算, 当 $a = p/q > 2$ 为互质假分数, 控制 $b = q^j$ 时, 序列 J 步不可预测, 这种序列称为渐进确定性随机序列^[19]。

根据式(6)生成确定性随机性序列:

$$\begin{cases} x_{n+1} = \text{mod}(ax_n, 1) \\ y_{n+1} = \text{mod}(bx_n, 1) \end{cases} \quad (6)$$

文献[20]推荐增加 p 和 q 的取值以增强序列 y_n 的随机性, 例如当满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_k = (k+1)^k / k^k = e$ 时, y_n 和 y_{n+1} 统计独立。

2.2 确定性随机序列构造的测量矩阵及其 RIP

确定性随机序列根据确定的数学结构生成, 同时还具有随机性, 本文利用式(6)生成的确定性随机序列构造测量矩阵, $a \approx e = p/q$ 以互质假分数代替近似, x_0 在 $(0,1)$ 内任意取值, 产生序列

y_n ($n=0 \sim M \times N-1$), 再令 $z_n = y_n - 0.5$, 按照行优先的原则组成测量矩阵 Φ 如下:

$$\Phi = \sqrt{\alpha_2/M} \begin{pmatrix} z_0 & z_M & K & z_{M(N-1)} \\ z_1 & z_{M+1} & L & z_{M(N-1)+1} \\ M & M & & M \\ z_{M-1} & z_{2M-1} & L & z_{MN-1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, $\sqrt{\alpha_2/M}$ 起归一化作用, 这里 α 取 12.5。

对于 N 维的信号 x , 稀疏度为 K , 存在 $\delta \in (0,1)$, 若满足:

$$(1-\delta)\|x\|_2^2 \leq \|\Phi x\|_2^2 \leq (1+\delta)\|x\|_2^2 \quad (8)$$

则称测量矩阵 Φ 拥有 K 阶的 RIP 性质, 即对于稀疏度小于 K 的信号均能保证准确重构。而实际中判断矩阵是否满足 RIP 性质比较困难。所以在实际设计测量矩阵时, 经常采用别的办法来判定测量矩阵是否满足重构要求, 如相关性判别理论, spark 判别理论^[21]等。文献[22]证明了所有亚高斯矩阵都满足 RIP, 而文献[23]证明了此类确定性随机序列属于亚高斯随机序列, 所以确定性随机矩阵满足 RIP。

2.3 基于确定性随机测量矩阵的重构实验

为了对确定性随机测量矩阵的性能进行有效评估, 实验信号采用 Matlab 生成了稀疏度为 K , 幅值为高斯分布的随机信号。选用 DFT 作为稀疏基将信号从时域变换到频域, 观测向量 y 由式(1)得到, 重构算法采用 OMP 算法。实验中系统参数 $a = e$ 用 p/q 近似, $b = q^2$ 。

分别对每一个不同的测量值 M 重复 500 次测试并统计重构成功的次数, 最后得到不同测量值 M 和稀疏度 K 下的重构成功率。如图 1 所示为分别采用高斯随机测量矩阵和确定性随机测量矩阵时信号的

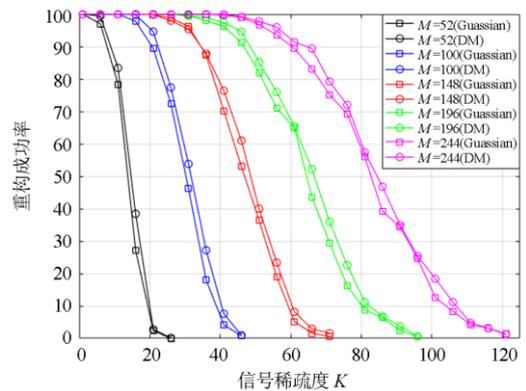


图 1 不同测量值 M 下稀疏度 K 和重构概率的关系

Fig. 1 Recovery rate based on sparsity K under different measurement M

重构成功率和信号稀疏度 K 之间的关系。可以看出对于各个测量值 M 下的不同稀疏度 K , 确定性随机性矩阵拥有和高斯随机测量矩阵几乎相同的重构成功率, 性能优良, 并且作为确定性矩阵, 相比起随机矩阵它拥有占用硬件资源少、易实现的优点。

3 变阈值的稀疏度自适应匹配追踪算法

对于传统的谐波测量方法, 频率分辨率的增加必将产生巨大的数据量, 导致处理速度降低。而且超高次谐波拥有时变性的特点, 因此传统谐波检测方法很难做到对超高次谐波准确快速的定位。

为了从采样到的低维数据中准确恢复出超高次谐波信号, 重构算法的选择是关键所在。贪婪算法因其复杂度低、易实现的特点是重构算法中最常用的算法, 常见的有正交匹配追踪算法^[8]、正则化正交匹配追踪算法^[24](Regularized Orthogonal Matching Pursuit, ROMP)、压缩采样匹配追踪算法^[25](Compressive Sampling Matching Pursuit, Co-SaMP)等。

上述算法的一个共同特点为需要预设待测信号的稀疏度 K , 然后将 K 作为算法停止迭代的条件, 计算残差和感知矩阵的内积, 通过不断迭代得到最后的支撑集, 最后完成信号的重构。

3.1 SAMP 算法

在实际应用中很难预知信号的稀疏度 K , 所以上述算法在工程实践中均具有局限性。为了找到一种能够有效代替 K 的停止迭代条件, 稀疏度自适应匹配追踪算法(Sparsity Adaptive Matching Pursuit, SAMP)算法引入了回溯的思想, 将重建过程分为多个阶段(Stage), 设定了一个固定的步长值, 通过不断迭代能做到在未知稀疏度的情况下对信号的精确重构。

核心算法步骤如下。

输入: 感知矩阵 $A = \Phi\Psi$, 采样向量 y , 步长 s 。

(1) 初始化: 残差 $r_0 = y$, $F_0 = \emptyset$, $L=s$, $stage=1$, $k=1$ 。

循环步骤(2)–(7)

(2) 初测试: $S_k = \text{Max}(|\Phi r_{k-1}|, L)$

(3) 候选集: $C_k = F_{k-1} \cup S_k$

(4) 最终测试: $F_k = \text{Max}(|\Phi_{C_k}^\dagger y|, L)$

(5) 更新残差: $r = y - \Phi_F \Phi_F^\dagger y$

(6) 若满足 $r_{\text{new}} < \varepsilon$, 停止迭代并重构 $\hat{\theta}$

(7) 若满足 $\|r\|_2 \geq \|r_{k-1}\|_2$, 则 $stage=stage+1$,

$S = S \times stage$, 返回步骤(2)。

(8) $F_k = F$, $r_k = r$, $k = k+1$, 返回步骤(2)。

算法的具体流程框图如图 2 所示。

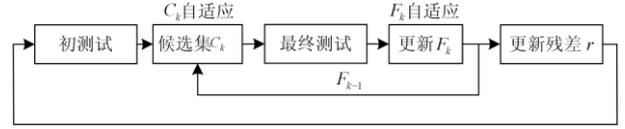


图 2 SAMP 算法框图

Fig. 2 SAMP algorithm flow chart

3.2 变阈值的改进 SAMP 算法

SAMP 算法在步骤(2)中进行预选时会选取当前步长 L 大小的元素个数, 在迭代中随着阶段(Stage)的增长步长 L 也会相应增大。当信号的稀疏度较大时, 在迭代后期每次从内积中选取的元素数目会很多, 这种情况下可能会发生误选, 导致算法反复迭代, 发生稀疏度过估计, 使得重构准确率下降甚至重构失败。而在实际中信号往往不像仿真实验中那么理想, 泄漏、噪声等外界因素都会增加发生这种现象的概率。

针对上述问题, 本文提出了变阈值的稀疏度自适应匹配追踪算法(VT-SAMP)。这种改进算法的核心思想是在步骤(2)中通过一个变化的阈值 μ 来代替步长 L 对内积选取元素个数的控制。

图 3 所示为稀疏度 $K=10$ 、 $N=250$ 的超高次谐波信号在 SAMP 算法的某次迭代中进行预选时的内积绝对值大小分布图。

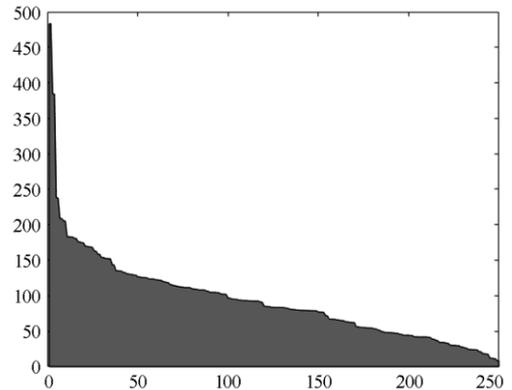


图 3 内积绝对值大小分布

Fig. 3 Distribution of the inner product

由图 3 可知, 内积的绝对值分布较为不均匀, 有一小部分值比较大, 其他大部分值较小。基于这种情况, 考虑设置一个动态阈值 μ , 当内积中的前 n 个值累加后占总的内积比例超过 μ 时则选取这 n 个元素作为此次预选集中的元素, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} s = \langle \Phi, r_{k-1} \rangle \\ s_{\text{sort}} = \text{sort}(|s|) \\ \sum_{i=1}^{n-1} (s_{\text{sort}})_i > \mu \times \text{sum}(|s|) \end{cases} \quad (9)$$

其中: s 为本次迭代的内积; r 表示残差; Φ 为测量矩阵; sort 表示降序排列; sum 表示求和。在这种选取准则下步骤(2)每次选择的原子数都是自适应变化的, 内积中的值存在一些极端值时选取的元素就少, 内积中的值分布比较平均时选取的元素就多。此外, 考虑到在迭代初期时估计稀疏度与真实稀疏度相差较大, 因此前期可以选择较少的元素, 加快迭代效率, 而在后期可以增大 $\Delta\mu$, 使得参与重构的原子更多, 提高在信号大稀疏度时的重构概率。当满足改变阈值的条件时, 按式(10)实时改变 μ 的大小:

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + \Delta\mu \\ \mu_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

这种预选元素数自适应变化的变阈值 SAMP 算法能明显改善信号大稀疏度时迭代误选而导致的稀疏度过估计现象, 更好地应对噪声以及频谱泄露问题。同时根据文献[14], 将相邻两次迭代的频谱能量差作为迭代终止条件也能改善频谱泄露现象。具体的算法步骤如图 4。

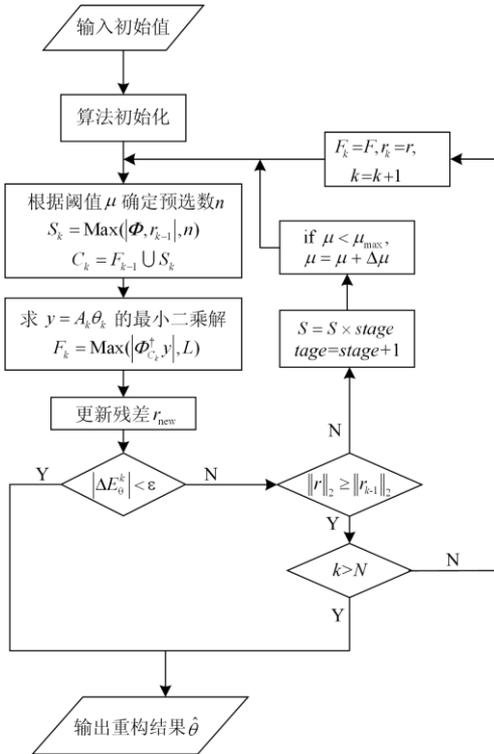


图 4 变阈值稀疏度自适应匹配追踪算法流程图

Fig. 4 Flow chart of VT-SAMP

4 仿真实验

为验证所提出算法在超高频谐波检测中的准确性, 本文模拟了实际电网中含有基波和超高频谐波的运行情况, 基频为电网额定频率 50 Hz, 超高频谐波成分通过 $x(t) = \sum A_h \cos(2\pi f_h t + \theta_h)$ 表示。采样频率为 500 kHz, 根据 IEC61000-4-30 标准中的 32 等时距测量方法, 将 200 ms 的数据分为每组 0.5 ms 进行测量。由于超高频谐波是 2~150 kHz 的成分, 故选用截止特性比较优异的切比雪夫滤波器^[26]作为带通滤波器, 其高低截止频率分别为 2 kHz 和 150 kHz。

4.1 超高频谐波频率在 2 kHz 整数倍下的仿真

实验 1 中选用含超高频谐波成分为 2 kHz 整数倍的电压信号, 基波以及相应谐波成分的取值如表 1 所示。

表 1 仿真信号的基波以及超高频谐波成分
Table 1 Fundamental and supraharmonic components of the simulated signal

谐波序号	频率/Hz	幅值/V
1	50	10
2	10×10^3	0.8
3	20×10^3	0.6
4	30×10^3	0.5
5	50×10^3	0.4
6	70×10^3	0.3
7	90×10^3	0.2
8	110×10^3	0.2
9	140×10^3	0.1

在仿真实验中, 取 32 组 0.5 ms 时间窗数据经 DFT 稀疏基 $x = \Psi\theta$ 转换到频域, 得到预处理后的离散稀疏信号, 再通过 $y = \Phi x$ 将谐波信号降维, 测量矩阵 Φ 为根据式(6)构成的确定性随机测量矩阵, 测量数 $M = 64$ 。设定 VT-SAMP 算法的阈值初始值和最大值分别为 0.1 和 0.6, 每隔 0.1 取一次值, 初始步长 $s = 2$ 。仿真分别采用 OMP 算法, SAMP 算法以及 VT-SAMP 算法对超高频谐波信号进行重构, OMP 的稀疏度估计值设置为 8, SAMP 算法的步长 $s = 2$ 。最后重构得到的超高频谐波信号频率和幅值结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 在超高频谐波成分为 2 kHz 整数倍时, 三种算法皆能准确定位超高频谐波。说明确定性测量矩阵拥有良好的重构性能, 而且相较于随机矩阵, 其矩阵元素可以直接通过数学计算得到, 易于硬件实现。在无频谱泄露的情况下两种 SAMP 算法的重构精度相当, 都好于 OMP 算法, 且 SAMP 算法无需预知稀疏度, 更具实际应用价值。

表 2 VT-SAMP 算法和其他算法重构结果对比

Table 2 Comparison of reconstructed results between SAMP algorithm and other algorithms

		设定值	10	20	30	50	70	90	110	140
频率/kHz	OMP 测量值	10	20	30	50	70	90	110	140	140
	SAMP 测量值	10	20	30	50	70	90	110	140	140
	VT-SAMP 测量值	10	20	30	50	70	90	110	140	140
	设定值	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	
幅值/V	OMP 测量值	0.799 6	0.599 4	0.499 4	0.399 3	0.299 3	0.199 4	0.199 2	0.099 1	
	SAMP 测量值	0.799 8	0.599 8	0.500 3	0.399 9	0.300 3	0.199 7	0.199 9	0.099 8	
	VT-SAMP 测量值	0.799 8	0.599 8	0.500 2	0.399 8	0.299 6	0.199 8	0.200 2	0.099 8	
	设定值	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	

4.2 超高次谐波频率在 2 kHz 非整数倍下的仿真

实验 2 中信号超高次谐波成分取 2 kHz 的非整数倍，基波与超高次谐波的成分的幅值大小如表 3 所示。在表 3 信号基础上加入了均值为 0，方差为 0.03 的高斯白噪声以模拟真实电网环境，其余仿真参数设置与实验 1 一致，重构结果如表 4 所示。

由表 4 可知，在频谱泄露以及噪声的影响下，OMP 算法和 VT-SAMP 算法在频率的定位上仍然较为准确，但 SAMP 算法出现了稀疏度过估计的情况，无论是精度还是运行时间已经不能满足要求，故视为重构失败。幅值方面，OMP 算法和 VT-SAMP 算法在幅值较大的谐波处都能满足较高的精度。在幅值较小的谐波处 OMP 算法与设定值相比发生了比较大的衰减，本文采用的 VT-SAMP 的算法虽然也出现了一定程度的衰减，但仍在可接受范围内。这

说明了 VT-SAMP 算法在频谱泄露和加噪的环境下也能较为准确地定位到超高次谐波的频率和幅值，稳定性和抗干扰能力更为优异。

表 3 仿真信号的基波以及超高次谐波成分

Table 3 Fundamental and supraharmonic components of the simulated signal

谐波序号	频率/Hz	幅值/V
1	50	10
2	10.2×10 ³	0.8
3	19.2×10 ³	0.6
4	30.6×10 ³	0.5
5	50.8×10 ³	0.4
6	70.3×10 ³	0.3
7	90.5×10 ³	0.2
8	110.2×10 ³	0.2
9	140.2×10 ³	0.1

表 4 VT-SAMP 算法和其他算法重构结果对比

Table 4 Comparison of reconstructed results between SAMP algorithm and other algorithms

		设定值	10.2	19.2	30.6	50.8	70.3	90.5	110.2	140.2
频率/kHz	OMP 测量值	10.1	19.2	30.6	50.8	70.3	90.5	110.2	140.2	140.2
	SAMP 测量值	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	VT-SAMP 测量值	10.2	19.2	30.6	50.8	70.3	90.5	110.2	140.2	140.2
	设定值	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	
幅值/V	OMP 测量值	0.789 7	0.586 2	0.481 1	0.374 3	0.266 3	0.161 1	0.125 9	0.053 5	
	SAMP 测量值	—	—	—	—	—	—	—	—	
	VT-SAMP 测量值	0.798 8	0.598 6	0.497 6	0.392 3	0.289 1	0.192 7	0.189 1	0.091 5	
	设定值	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	

5 实测数据分析

为了验证本文所提出的超高次谐波检测算法的有效性，对含有电动汽车充电桩的配电站进行了实时的测量和分析，原理如图 5 所示。

实验的检测硬件如图 5 中所示，是由某高校开发的超高次谐波检测样机，装置基于美国 NI 公司生产的 PXIe-5172 采集板卡开发，最高能检测 500 MHz

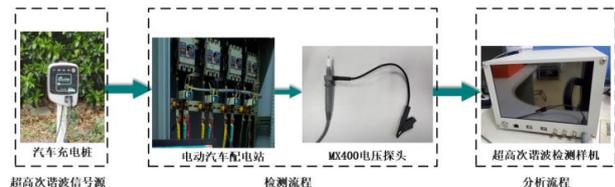


图 5 超高次谐波实测原理图

Fig. 5 Supraharmonics measurement principle

的信号, 通过 MX400 电压检测探头(最高采样率 250 Ms/s)将检测到的信号上传至上位机程序 Labview 进行分析。实测算法程序基于本文所提出的压缩感知算法模型, 通过快速傅里叶变换(FFT)对谐波信号预处理, 将时域连续信号转换成频域离散信号, 在经过确定性随机测量矩阵对其进行降维后采用 VT-SAMP 算法准确地重构出原信号的频谱。

实测采用 32 等时矩数据窗测量方法, 在对 32 组 200 ms 长度的信号滤波后使用确定性测量矩阵进行数据采集, 矩阵所占内存明显小于使用随机测量矩阵, 算法的参数设定与仿真实验设定一致。没有电动汽车充电时配电站 A 相出线电压频谱图如图 6 所示。

在仿真实验中选择某国产品牌电动汽车作为测试对象, 实验时电动汽车连接充电桩进行充电, 当只有一台该品牌汽车充电时配电站 A 相出线的频谱图如图 7 所示, 当同时有两台该品牌汽车连接充电桩充电时 A 相出线的频谱图如图 8 所示。

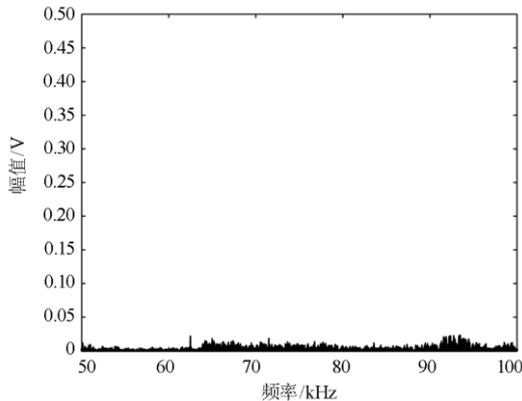


图 6 无电动汽车充电时频谱

Fig. 6 Spectrogram when EV non-charging

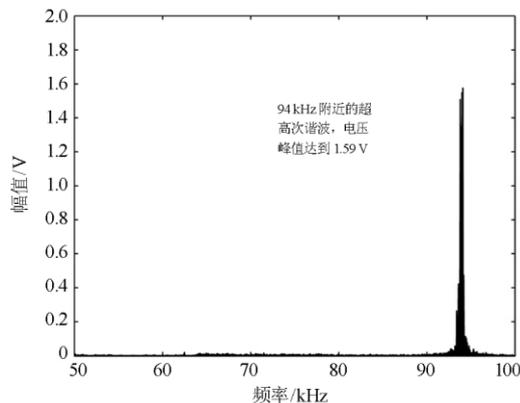


图 7 一台电动汽车充电时频谱

Fig. 7 Spectrogram when an EV charging

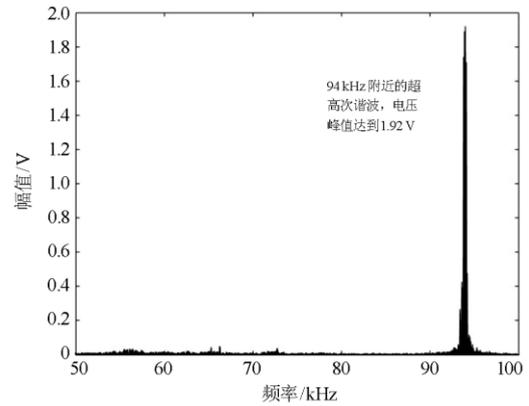


图 8 两台电动汽车充电时频谱

Fig. 8 Spectrogram when two EVs charging

由图 7 可知, 当只有一台电动汽车在充电桩处充电时, 配电站 A 相出线电压频谱在 94 kHz 附近有一个明显的超高次谐波产生, 其幅值最高达到了 1.59 V。此时在充电桩处再接入一台同品牌的电动汽车进行充电, 配电站 A 相频谱如图 8 所示, 在 94 kHz 频率附近产生了一个最高幅值为 1.92 V 的超高次谐波。由图 7 和图 8 可见实际中信号含有较多噪声干扰, 而本文提出的算法仍能准确检测出超高次谐波的频率和幅值。

实测中超高次谐波的成分在 94 kHz 附近, 与电动汽车充电桩逆变器的开关频率是一致的, 再次验证了电动汽车充电装置是超高次谐波的来源^[27]。对比图 7 和图 8, 可以发现在充电站处增加电动汽车数量时, 超高次谐波具有明显的叠加效应, 并且是与谐波相角有关的矢量叠加, 非简单的线性叠加。随着配电网中电动汽车的数量越来越多^[28], 占比越来越高^[29]。电动汽车的接入已经发展成一个重要的研究方向^[30-33]。大规模的电动汽车充电可能引发的超高次谐波现象值得关注和进一步研究。

6 结论

本文针对传统谐波检测算法在超高次谐波检测中对采样端硬件要求过高, 而现有的基于压缩感知的 CS-SAMP 超高次谐波检测算法又存在受频谱泄露影响大的问题, 提出了一种基于确定性测量矩阵和变阈值 SAMP 算法的超高次谐波检测方法。该算法能够做到对超高次谐波幅值和频率的精确定位, 相较于 SAMP 算法, 其针对频谱泄露和噪声的稳定性和抗干扰性能更加优良, 也更易于硬件实现。

参考文献

- [1] SARAH K, BOLLEN M H J, AMARIS H, et al. On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150

- kHz—review and research challenges[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 150: 1-10.
- [2] 林海雪. 电网谐波问题的新发展——谈超级谐波[J]. *供用电*, 2016, 33(1): 35-38.
LIN Haixue. The new development of harmonic problems in power grid—about supraharmonics[J]. *Distribution & Utilization*, 2016, 33(1): 35-38.
- [3] 刘森, 黄毕尧, 王聪, 等. 超级谐波研究综述[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(12): 7-15.
LIU Sen, HUANG Biyao, WANG Cong, et al. A review on the studies of supraharmonics[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(12): 7-15.
- [4] 肖勇, 房莹, 张捷, 等. 低压电力线载波通信信道特性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(20): 20-25.
XIAO Yong, FANG Ying, ZHANG Jie, et al. Research on characteristics of low voltage power line communication channel[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(20): 20-25.
- [5] CENELE C. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment systems in the frequency range below 150 kHz: CLC/TR 50627—2015[S]. *European Standards*, 2015.
- [6] AGUDELO-MARTÍNEZ D, LIMAS M, PAVAS A, et al. Supraharmonic bands detection for low voltage devices[C] // 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), October 16-19, 2016, Belo Horizonte, Brazil.
- [7] KLATT M, MEYER J, SCHEGNER P. Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz[C] // 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), May 25-28, 2014, Bucharest, Romania.
- [8] 庄双勇, 赵伟, 黄松岭. 基于压缩感知 OMP 的超谐波测量新算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 73-81.
ZHANG Shuangyong, ZHAO Wei, HUANG Songling. New supraharmonic measurement algorithm based on CS-OMP[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 73-81.
- [9] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [10] 杨挺, 武金成, 袁博. 谐波和间谐波检测的压缩感知恢复算法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5475-5482.
YANG Ting, WU Jincheng, YUAN Bo. The restoration algorithm of compressed sensing to detect harmonic and inter-harmonic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5475-5482.
- [11] RAUHUT H, SCHNASS K, VANDERGHEYNST P. Compressed sensing and redundant dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(5): 2210-2219.
- [12] DEVORE R A. Deterministic constructions of compressed sensing matrices[J]. *Journal of Complexity*, 2007, 23(4).
- [13] YU L, BARBOT J P, ZHENG G, et al. Compressive sensing with chaotic sequence[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(8): 731-734.
- [14] 刘嫣, 汤伟, 刘宝泉. 基于压缩感知的电能质量扰动数据稀疏分析与改进重构算法[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(15): 3461-3470.
LIU Yan, TANG Wei, LIU Baoquan. Data sparse analysis and improved reconstruction algorithm of power quality disturbance based on compressed sensing[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(15): 3461-3470.
- [15] CANDES E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies?[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [16] 曹思扬, 戴朝华, 朱云芳, 等. 一种新的电能质量扰动信号压缩感知识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 7-12.
CAO Siyang, DAI Chaohua, ZHU Yunfang, et al. A novel compressed sensing-based recognition method for power quality disturbance signals[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 7-12.
- [17] 尹立敏, 齐敏, 雷钢, 等. 基于超完备字典的压缩感知电能质量数据重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(8): 88-94.
YIN Limin, QI Min, LEI Gang, et al. Reconstruction of compressed sensing power quality data based on overcomplete dictionary[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 88-94.
- [18] GONZALEZ J A, DE CARVALHO L B. Analytical solutions to multivalued maps[J]. *Modern Physics Letters B*, 1997, 11(12): 521-530.
- [19] WANG K, PEI W, ZOU L, et al. The asymptotic deterministic randomness[J]. *Physics Letters A*, 2007, 368(1-2): 38-47.
- [20] WANG K, PEI W, XIA H, et al. Pseudo-random number generator based on asymptotic deterministic randomness[J]. *Physics Letters A*, 2008, 372(24): 4388-4394.
- [21] 刘建军, 王鹤, 崔国宇, 等. 一种基于矢量电场的多电极电场梯度计算优化方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 113-119.
LIU Jianjun, WANG He, CUI Guoyu, et al. Study on optimization method of multi-electrode electric field gradient calculation based on vector electric field[J]. *Power*

- System Protection and Control, 2018, 46(13): 113-119.
- [22] MENDELSON S, PAJOR A, TOMCZAK-JAEGERMANN N. Uniform uncertainty principle for Bernoulli and Subgaussian ensembles[J]. Constructive Approximation, 2008, 28(3): 277-289.
- [23] 王侠, 王开, 王青云, 等. 压缩感知中的确定性随机观测矩阵构造[J]. 信号处理, 2014, 30(4): 436-442.
WANG Xia, WANG Kai, WANG Qingyun, et al. Deterministic random measurement matrices construction for compressed sensing[J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(4): 436-442.
- [24] APPASANI B, MOHANTA D K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 383-399. DOI: 10.1186/s41601-018-0110-4.
- [25] NEEDE L L, DEAN N A, VERSHYN I N, et al. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3).
- [26] 李振兴, 谭洪, 叶诗韵, 等. 应用 ΔI 极性与信号处理的 UHVDC 输电线路保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 68-75.
LI Zhenxing, TAN Hong, YE Shiyun, et al. A new scheme for UHVDC transmission line protection using ΔI polarity and signal processing[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 68-75.
- [27] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 超高次谐波问题及其研究现状与趋势[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 353-365.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. Review and development tendency of research on 2~150 kHz supraharmonics[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 353-365.
- [28] 程杉, 许林峰, 孙伟斌. 基于电压稳定性的电动汽车充电站最优规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 3-12.
CHENG Shan, XU Liufeng, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles based on voltage stability of distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 3-12.
- [29] 马文彪, 程亮, 陈红坤. 考虑电动汽车有序充电的主
动配电网网架规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 83-91.
MA Wenbiao, CHENG Liang, CHEN Hongkun. Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 83-91.
- [30] 倪凯旋. 基于分布式博弈的电动汽车充电站最优调度方法[J]. 供用电, 2020, 37(2): 79-84.
NI Kaixuan. Optimal scheduling of electric vehicle charging station based on distributed game[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 79-84.
- [31] 王威, 贺旭, 王晴. 电动汽车充电对电网负荷和电气设备的影响[J]. 供用电, 2018, 35(9): 79-84.
WANG Wei, HE Xu, WANG Qing. Impacts of electric vehicles charging on grid load and electrical equipment[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9): 79-84.
- [32] 张娅婷, 陈中, 段然. 考虑主动响应的电动汽车充电站-配电网协同规划[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 71-77.
ZHANG Yating, CHEN Zhong, DUAN Ran. Collaborative planning of electric vehicle charging station-distribution network considering active response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 71-77.
- [33] 高峰, 谈韵, 陶远鹏. 电动汽车驱动充电一体化控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 73-77, 113.
GAO Feng, TAN Yun, TAO Yuanpeng. Research on the integrated control strategy of electric vehicle driving and charging[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 73-77, 113.

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-02-28

作者简介:

刘建锋(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光电互感器、数字化变电站智能装置及电力系统、电气信息检测; E-mail: bansen@sina.com

宋子恒(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量. E-mail: ziheng.song@qq.com

(编辑 葛艳娜)