

· 专论与综述 ·

基于 EMD 去噪的 Prony 算法在电网事故分析中的应用

胡昊明¹, 江叶峰², 葛亚明², 尤伟², 张宁宇¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103;2.江苏省电力调度控制中心,江苏南京 210024)

摘要:基于 DSA 系统,江苏省电力调度控制中心开展了电网事故反演分析。在仿真曲线与 PMU 录波的比对分析过程中,发现 PMU 信号在测量、传输过程中引入的随机噪声可能严重干扰 Prony 分析结果的精确性。文中提出应用基于噪声统计特性的 EMD 算法作为 Prony 分析的前置滤波环节,通过随机重排循环,对 EMD 分解得到的噪声分量进行抑制,大幅降低噪声能量,提高重构信号的信噪比,从而改善 Prony 算法的分析精度。通过测试信号与江苏电网实际故障后分析算例,验证了算法的有效性与实用性。

关键词:随机噪声;统计特性;EMD 去噪;Prony 算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0001-06

近年来,在建设智能电网新形势的要求下,电网状态估计技术得到了长足的发展;不仅建立了更完整、更详细的电网模型,而且可为高级应用程序提供更灵活的扩展接口,从而为电力系统分析的在线化提供了有力的数据支撑^[1]。在此基础上,江苏省电力调度控制中心于 2012 年 12 月部署了在线安全稳定分析(DSA)系统。DSA 系统基于状态估计提供的实时电网运行方式与量测数据,对电网进行不间断的在线稳定分析,内容包括静态安全分析、暂态安全分析等六大类计算。同时,江苏电网已经全面部署了广域测量(WAMS)系统,全网各节点装设的向量测量单元(PMU)以每秒 100 帧的采样率采集节点功率、电压、发电机相角等信息,通过高速网络传输至位于调度中心的控制主站,并存储于大型数据服务器^[2]。DSA 与 WAMS 系统的建立,为电网事故的在线监测、辅助决策、回溯分析提供了极大便利^[3,4],是建设智能电网的重要基础。

在应用 DSA 进行事故反演计算的过程中,可能出现仿真曲线与实际 PMU 录波曲线在形态上极为相似,但 Prony 分析结果差异较大的状况。原因在于 Prony 算法对于噪声较为敏感^[5],PMU 测量信号在测量、转换、传输过程中引入噪声干扰导致 Prony 分析结果明显偏离实际。经验模态分解(EMD)是一种滤波算法,通过选择合适的本征模式函数(IMF)阶数,可构成自适应的高通、低通、带通或带阻滤波器^[6]。然而,EMD 算法存在固有的不确定性及模态混叠问题,对于信噪比较低的信号,处理能力有限。

1 随机噪声特性分析

电力系统测量量在采集、转换、传输过程中,往往存在各类随机扰动。因此,研究随机噪声的数学特性,寻找随机噪声的抑制措施是十分必要的。

1.1 随机噪声的数学表示

随机噪声是由多种复杂因素造成的,包含着随机性与不可测性,在数学上可以近似用高斯白噪声模型表示,其定义如下:

(1) 信号的幅值满足高斯分布,即其概率分布为正态函数;

(2) 信号的平均期望为 0;

(3) 信号的二阶矩不相关,一阶矩为常数,即前后信号无关联。

理论上高斯白噪声为一无限长序列。但在工程应用中,在随机噪声信号序列足够长的情况下,也认为其近似满足以上性质。

1.2 随机重排—累加平均对随机噪声功率的影响

信号的强度可以用其功率来描述。对于长度为 N 的离散信号序列 $n_0(i)$,其功率定义:

$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_0^2(i) \quad (1)$$

将序列 $n_0(i)$ 进行随机排序得到序列 $n'_0(i)$,由于 $n'_0(i)$ 与 $n_0(i)$ 相比仅仅是各元素位置改变而幅值并未改变,故序列 $n'_0(i)$ 的功率与原序列相同:

$$P'_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n'^2_0(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_0^2(i) = P_0 \quad (2)$$

与原信号平均得到一次重构后的新信号 $n_1(i)$:

$$n_1(i) = \frac{n_0(i) + n'_0(i)}{2} \quad (3)$$

考察重构信号的功率变化情况,则:

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{n_0(i) + n'_0(i)}{2} \right)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_0^2(i) + n'^2_0(i) + 2n_0(i)n'_0(i)}{4} \leq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_0^2(i) + n'^2_0(i) + n_0^2(i) + n'^2_0(i)}{4} =$$

$$\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (n_0^2(i) + n_0'^2(i)) = P_0 \quad (4)$$

即:

$$P_1 \leq P_0 \quad (5)$$

式(5)中等号成立的条件为:

$$n_0(i) = n_1(i) \quad i=1, 2, \dots, N$$

对于一般的随机噪声信号,上式成立的可能性是极小的。可见,通过随机排序—累加—取平均操作,可以降低噪声信号功率。

如果重复以上随机重排—累加平均操作,得到新信号 $n_2(i), n_3(i), \dots, n_L(i)$, 则重构信号的功率不断降低。当循环次数 L 趋近于无穷大时,信号 $n_L(i)$ 趋近于一常数序列。对于白噪声信号而言,由于 $E[n_L(i)] = 0$, 故信号 $n_L(i)$ 的功率趋近于 0。

构造随机噪声信号序列 $n_0(i)$ 如图 1 所示。信号采样频率为 100 Hz, 共 1001 个采样点。

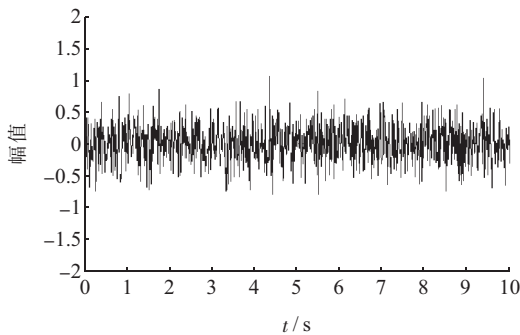


图 1 随机噪声信号

对噪声信号进行随机重排—累加平均操作,迭代次数为 10 次,计算每次迭代得到新信号的功率,信号功率 P 随迭代次数 n 的变化趋势如图 2 所示。

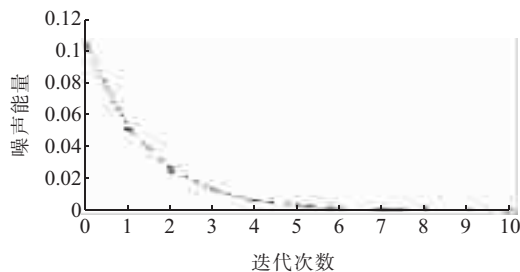


图 2 噪声功率与迭代次数关系

信号功率随迭代次数增加而减小。迭代 4 次之后,信号的功率已经降至原始信号的 10% 以下,随着迭代次数增大,随机噪声信号的功率趋近于 0。

2 Prony 算法与 EMD 算法性能比较分析

Prony 算法与 EMD 算法是 2 种常用的信号辨识算法。Prony 分析通过对信号进行拟合,得到信号中包含模式的频率、阻尼比等参数。EMD 具有时变、自适应

等特性^[7,8],在各领域得到了广泛的应用。本节基于测试信号,对 Prony 算法与 EMD 算法对于含噪信号的辨识能力进行对比分析。

2.1 测试信号

为了考察 2 种算法对于实际含噪信号的处理能力,构造以下测试信号:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} S_1 = 2e^{-0.0027t} \cos(2 \times 0.423\pi t + 110^\circ) \\ S_2 = 2e^{-0.0311t} \cos(2 \times 0.2473\pi t + 20^\circ) \\ S_3 = 2e^{-0.2652t} \cos(2 \times 0.42\pi t + 13^\circ) \\ S_4 = e^{-0.2936t} \cos(2 \times 1.0349\pi t + 60^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

测试信号的波形如图 3 所示。信号的分量参数如表 1 所示。

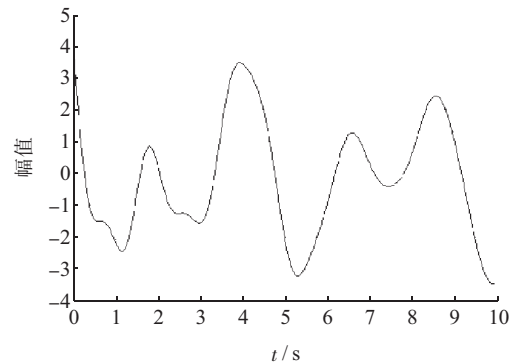


图 3 测试信号的波形

表 1 信号的分量参数

| 序号 | 幅值 | 频率 / Hz | 阻尼比 / % |
|-------|-----|---------|---------|
| S_1 | 2.0 | 0.423 | 0.10 |
| S_2 | 2.0 | 0.247 | 2.00 |
| S_3 | 2.0 | 0.420 | 10.00 |
| S_4 | 2.0 | 1.035 | 4.51 |

在原始信号上叠加 6.9 dB 白噪声干扰(信号信噪比为 2),如图 4 所示。

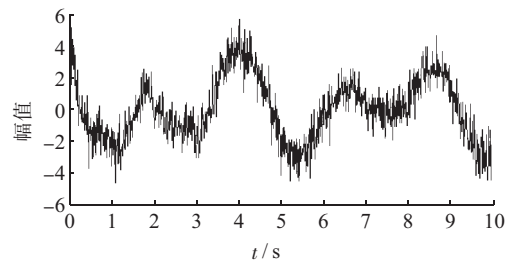


图 4 含随机噪声的信号波形

2.2 Prony 算法对于含噪信号的处理能力

Prony 算法要求输入信号 y 为等间距采样的时间序列,假设该数据序列由一组具有任意振幅、频率、初相位和衰减因子的指数函数线性组合而成:

$$y = \sum A e^{-\alpha t} \cos(2\pi f t + \theta) \quad (8)$$

式(8)中: A 为幅值; α 为衰减因子; f 为振荡频率; θ 为初始相角。

测量输入 $x(0), \dots, x(N-1)$ 的估计值可以表示为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^P b_m z_m^n \quad (9)$$

Prony 算法的计算步骤如下。

(1) 构造二阶矩样本矩阵。定义二阶矩样本函数如下:

$$r(i, j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j)x^*(n-i) \quad i, j = 0, 1, \dots, P \quad (10)$$

式(10)中: N 为数据采样点数; P 为样本矩阵阶数;采样数据为实数序列。

则二阶矩的样本矩阵形式:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,L) \\ r(2,0) & r(2,1) & \dots & r(2,L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(L,0) & r(L,1) & \dots & r(L,L) \end{bmatrix} \quad (11)$$

为了使样本矩阵全面反映系统信息,维数 L 取其最大值 $N/2$ 。

(2) 确定计算阶数。通过一定的规则确定模型阶数 p ,通常采用奇异值分解方法(SVD)进行。

(3) 求解回归参数。求解以下方程组得回归(AR)参数,其中 ε_p 为最小误差能量:

$$\begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & \dots & r(0,P) \\ r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,P) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(P,0) & r(P,1) & \dots & r(P,P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

(4) 求解特征方程。特征方程形式为:

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p} = 0 \quad (13)$$

求解得到了特征根 z_i ($i=1, 2, \dots, P$),称为 Prony 极点。

(5) 求解 \mathbf{b} 向量。式(10)可以写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(0) \\ \hat{x}(1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $[\hat{x}(0)\hat{x}(1)\dots\hat{x}(N-1)]^T$ 为原始信号估计值:

$$\hat{x}(n) = \begin{cases} x(n) & 0 \leq n \leq P \\ -\sum_{i=1}^P a_i \hat{x}(n-i) & P+1 \leq n \leq N-2 \end{cases} \quad (15)$$

(6) 求解各分量参数。通过求解线性方程组得到系数 b_m 和 z_m 之后,可以根据如下公式得到各振荡分

量的参数:

$$\begin{cases} A_m = |b_m| \\ \theta_m = \arctan[\operatorname{Im}(b_m)/\operatorname{Re}(b_m)] \\ \alpha_m = \operatorname{Ln}|z_m|/\Delta t \\ f_m = \arctan[\operatorname{Im}(z_m)/\operatorname{Re}(z_m)]/2\pi\Delta t \end{cases} \quad (16)$$

对无噪声扰动的原始信号进行 Prony 分析,结果如表 2 所示。

表 2 原始信号的 Prony 分析

| 分量 | 幅值 | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|----|-------|---------|-------|
| 1 | 2.000 | 0.423 0 | 0.102 |
| 2 | 2.000 | 0.247 3 | 2.001 |
| 3 | 2.000 | 0.42 | 9.991 |
| 4 | 1.000 | 1.034 9 | 4.511 |

在无噪声干扰时,Prony 算法可精确提取信号各分量的频率、幅值、阻尼比等参数,计算值与真值差异极小。对含噪声信号进行 Prony 分析,结果如表 3 所示。

表 3 含噪信号 Prony 分析

| 分量 | 幅值 | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|-----|---------|-------|--------|
| 1 | 2.932 2 | 6.058 | 2.388 |
| 2 | 2.594 7 | 5.807 | 3.878 |
| 3 | 2.591 1 | 0.782 | 28.868 |
| 4 | 2.330 3 | 0.435 | 1.311 |
| 5 | 2.307 5 | 4.441 | 34.560 |
| 6 | 2.194 0 | 0.243 | 2.481 |
| ... | ... | ... | ... |

由表 3 可见,随机噪声对 Prony 分析影响较大,分析结果中出现幅值较大,而阻尼较弱的虚假模式,如模式 1、模式 2 等,真实分量淹没在噪声中。因此在对电力系统量测信号进行 Prony 分析之前,需加入前置滤波环节,以削弱或消除噪声的影响。

2.3 EMD 算法对于含噪信号的处理能力

EMD 算法将复杂信号分解为一系列简单基本的固有模式函数分量,以便于提取各个分量的幅值、相位等信息,具体过程为:

(1) 对于信号序列 $s(t)$,找到其极大值点和极小值点;

(2) 对极大值点序列和极小值点序列利用三次样条插值进行拟合,得到极大值点包络线 $v_1(t)$ 和极小值点包络线 $v_2(t)$,取 $m = \frac{1}{2}[v_1(t) + v_2(t)]$;

(3) 将 m 从 $s(t)$ 中减去, $h = s(t) - m$;

(4) 将 h 作为新的 $s(t)$,重复操作(1)至(3),直到极值点的包络线平均值 m 趋于 0,令 $c_1 = h$,则 c_1 为第一个 IMF 信号;

(5) 求余量 $r = s(t) - c_1$;

(6) 将 r 视为新的 $s(t)$ 重复以上过程, 求取第二个 IMF 信号 c_2 , 第三个信号 c_3 , 直到余量 r 因极值点过少而不能进行分解。此时 r 为一个趋于平稳的量。

传统 EMD 滤波算法的过程为:

(1) 对原始信号进行 EMD 分解, 得到若干个 IMF 分量与一个趋势分量;

(2) 在噪声分量集中在信号的高频段, 且真实信号功率远大于噪声功率的前提下, 直接抛弃前 n 个 IMF 分量;

(3) 取其余 IMF 分量与趋势分量重构, 得到滤波后信号。

在实际操作中, 如何确定抛弃 IMF 分量的阶数 n 是值得研究的问题。通常采用的方式是计算各分量的功率, 找到功率发生突变的分量, 用该分量及其后的所有分量重构原信号。该方法的基础是认为信号中主导模式的功率远大于噪声分量的功率。在信号信噪比较高的情况下, 这种直接抛弃前面若干个功率较低 IMF 分量, 取余下 IMF 作为主导模式分量的方法, 可以较为精确地重构原始信号。但在信噪比较低的情况下, 噪声信号功率接近甚至超过主导模式分量, 功率判据失效, 因而舍弃 IMF 分量的个数通常难以确定。同时, 由于 EMD 算法存在固有的不确定性及模态混叠效应, 不能保证抛弃的 IMF 中不包含有用信息。因此, 在信噪比较低的情况下, 采用传统 EMD 算法往往不能很好地达到去噪目的。例如, 对第 1 节中的含噪信号进行 EMD 分解, 得到 7 个 IMF 分量与 1 个剩余趋势分量, 如图 5 所示。

从分解结果可以看到, 分解得到的前 3 个分量均为高频噪声分量, 但 IMF 4, IMF 5 的 2 个分量既包含噪声, 也包含原始信号中的信息。如果直接丢弃, 重构信号将会失去原始信号中的部分信息, 导致重构信号与原始信号之间有较大差异。

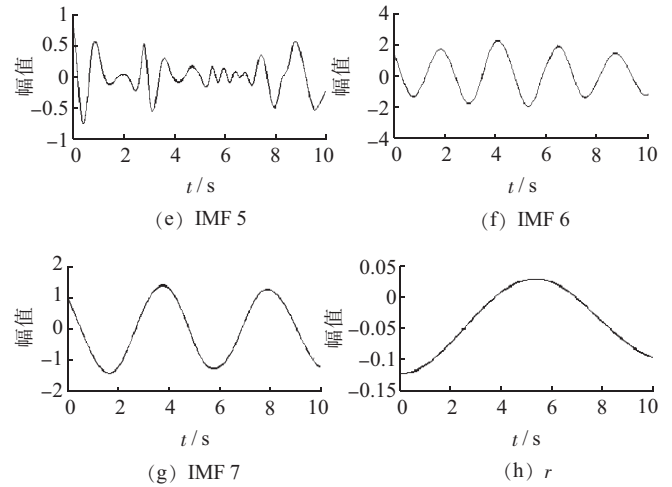
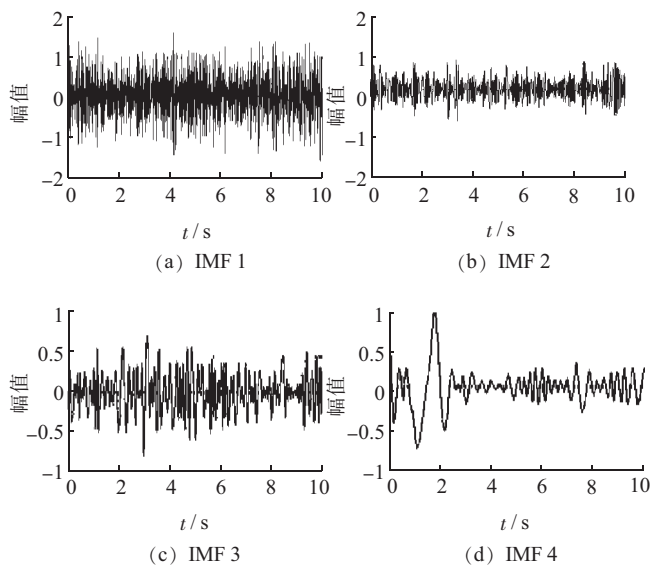


图 5 含噪声信号的 EMD 分解结果

3 基于 EMD 滤波的 Prony 算法

由上节分析可知, 对于信噪比较低的信号, 使用单一的 EMD 算法或 Prony 算法均难以达到理想效果, 因此, 利用 EMD 算法的去噪特性, 将其作为前置滤波环节, 对降噪后的信号进行 Prony 分析, 是可以考虑的方法。基于对噪声统计特性的分析, 可以考虑首先通过随机排序—叠加平均手段降低 EMD 分解所得噪声分量的功率, 再与其他分量进行重构, 达到提高信噪比的目的。算法过程为:

(1) 对原始信号 $y_0(i)$ 进行 EMD 分解, 并认为分解得到的第一个 IMF 分量为随机噪声信号 $n_0(i)$;

(2) 对 $n_0(i)$ 进行随机排序, 得到信号 $n'_0(i)$, 取 2 者平均值, $n_1(i) = \frac{n_0(i) + n'_0(i)}{2}$;

(3) 将 $n_1(i)$ 作为原始信号, 重复步骤 (2) 的操作, 得到功率降低的噪声信号 $n_L(i)$;

(4) 将 $n_L(i)$ 于 EMD 分解得到的除第一个 IMF 外的其余分量重构, 得到信噪比改善的信号 $y_1(i)$;

(5) 若需要进一步提高信噪比, 则重复步骤 (1) 至 (4), 得到新信号 $y_2(i), y_3(i), \dots, y_M(i)$ 。

应用上述方法, 针对含噪信号 EMD 分解结果中第一个 IMF 分量, 采用随机重排—累加平均抑制其功率 (迭代次数为 10), 与其他 7 个分量重构, 得到信噪比提高的信号序列, 如图 6 所示。与原始含噪信号 (图 4) 相比, 信号信噪比有所改善。为了进一步提高信号信噪比, 继续对信号进行降噪循环, 将历次循环得到结果与真实信号进行对比, 如图 7 所示。

由图 7 可看到, 经过 3 次降噪得到的信号已经与真实信号较为接近。对降噪后的信号进行 Prony 分析, 结果如表 4 所示。

经过 3 次降噪后的信号, Prony 分析结果与真实

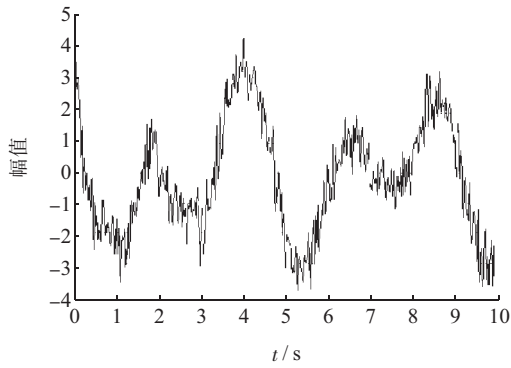
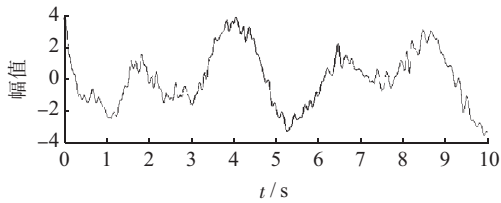
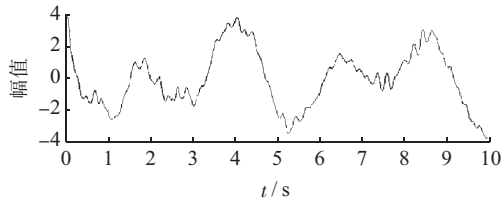


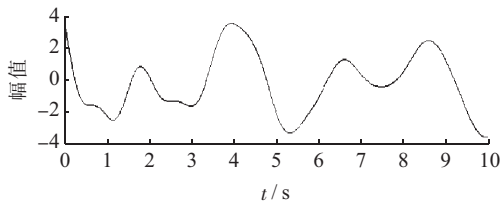
图 6 第一次降噪结果



(a) 2次降噪后的信号



(b) 3次降噪后的信号



(c) 原始信号

图 7 降噪信号与原始信号对比

表 4 降噪信号的 Prony 分析结果

| 分量 | 幅值 | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|-----|---------|-------|--------|
| 1 | 2.112 1 | 0.434 | 0.523 |
| 2 | 1.913 7 | 0.243 | 1.770 |
| 3 | 1.058 3 | 1.054 | 4.739 |
| 4 | 0.890 4 | 0.734 | 23.079 |
| 5 | 0.658 9 | 1.443 | 8.628 |
| ... | ... | ... | ... |

信号接近,其中分量 1,2,3 均为原信号中的主导模式,幅值、频率等参数计算误差均在工程可接受范围内。可见基于噪声统计特性的 EMD 算法可以有效抑制信号中随机噪声的功率,作为 Prony 算法的前置滤波环节,可以削弱噪声对 Prony 分析的影响,提高分析的精确程度。

4 江苏电网故障后分析

2014 年 4 月 4 日 15:33,江苏电网发生故障,溧车 5249 线 A 相单相短路,重合不成功跳三相。江苏省电

力调度控制中心应用 DSA 与 WAMS,开展了事故后分析工作。调阅事故时刻 PMU 录波曲线,线路三相跳开后,利港电厂 1 号机有功振荡情况如图 8 所示。

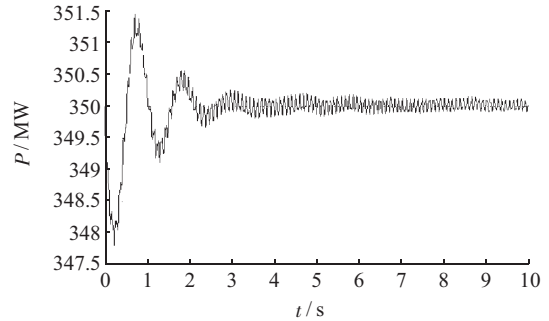


图 8 利港 1 号机有功 PMU 录波曲线

利港厂 1 号机在故障后功率第一摆峰峰值在 3.2 MW 左右,5 s 后振荡趋于平息,显示系统阻尼特性良好。PMU 录波曲线中包含明显的随机噪声扰动。应用基于噪声统计特性的 EMD 算法对 PMU 录波信号进行 2 次滤波去噪,结果如图 9 所示。

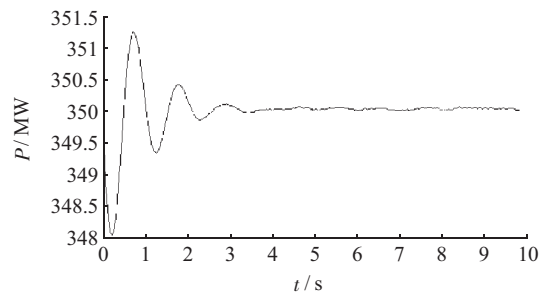


图 9 滤波后的有功振荡曲线

从滤波结果可见,算法对于信号中的随机噪声扰动,有较好的抑制效果。对滤波后的信号进行 Prony 分析,结果如表 5 所示。

表 5 PUM 曲线的 Prony 分析结果

| 分量 | 幅值 | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|-----|-----------|---------|--------|
| 1 | 350.158 0 | 0.000 0 | 100.00 |
| 2 | 0.522 6 | 0.949 | 15.416 |
| 3 | 0.518 0 | 7.341 | 34.953 |
| 4 | 0.006 1 | 0.861 | 11.403 |
| 5 | 0.178 7 | 11.520 | 27.809 |
| ... | ... | ... | ... |

计算结果中,模式 1 为直流分量,模式 2 为振荡的主导模式,其频率为 0.949 Hz,阻尼比为 15.416%。其余模式幅值较小或阻尼比较强。基于当时数据断面,应用 DSA 进行事故的反演仿真,事故后利港电厂 1 号机有功振荡情况如图 10 所示。

仿真结果曲线与 PMU 录波曲线在形态上比较接近。对曲线进行 Prony 分析,结果如表 6 所示。

Prony 分析表明,仿真曲线主导模式频率为 0.965 Hz,与 PMU 录波曲线相符;仿真曲线阻尼比为

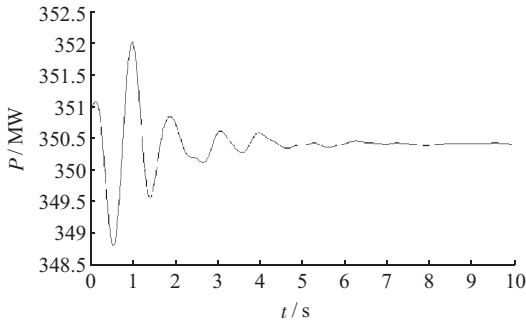


图 10 利港 1 号机有功振荡仿真曲线

表 6 仿真曲线的 Prony 分析结果

| 分量 | 幅值 | 频率 /Hz | 阻尼比 /% |
|-----|-----------|---------|--------|
| 1 | 350.420 3 | 0.000 0 | 100.00 |
| 2 | 1.899 7 | 0.965 | 13.249 |
| 3 | 1.435 5 | 1.367 | 11.315 |
| 4 | 0.248 2 | 0.375 | 15.802 |
| 5 | 0.196 5 | 2.187 | 9.514 |
| ... | ... | ... | ... |

13.249%，与 PMU 录波曲线接近，但仍存在一定的差异，考虑到江苏 DSA 中，全网所有机组均未建立一次调频模型，仿真曲线阻尼比较实际略低是可以理解的。同时，曲线比对结果证明，建立电网详细、完整的模型，尤其是发电机动态模型，对于提高 DSA 的仿真精度是十分重要的。

5 结束语

在电网故障反演计算过程中，时常出现 PMU 量测信号中的随机噪声严重影响信号 Prony 分析精度，导致分析结果出现大量虚假模式，淹没主导模式的情况。噪声的统计特性研究表明，随机排序—累加平均操作可以降低随机噪声的功率，随着迭代次数的增加，噪声功率趋近于零。本文在此基础上，提出将基于噪声统计特性的改进 EMD 算法作为 Prony 算法的前置滤波环节，

对原始 PMU 录波曲线进行降噪，提高了 Prony 算法的精度。江苏电网 2014 年 4 月 4 日溧车 5249 线故障后仿真分析算例表明，该算法可以显著提高 PMU 测量信号的信噪比，滤波后信号中的噪声分量得到了明显抑制，其 Prony 分析结果与 DSA 仿真曲线可以取得较好的一致性。

参考文献：

- [1] 刘辉乐, 刘天琪. 电力系统动态状态估计的研究现状和展望[J]. 电力自动化设备. 2005, 24(12): 73-77.
- [2] 戴则梅, 葛云鹏, 张珂珩, 等. 电网广域监测系统的数据库集成方案[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 1-4.
- [3] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 32(6): 25-30.
- [4] 戴则梅, 陆进军, 闪鑫, 等. PMU 数据在控制中心的集成应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 8-11.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J]. 中国电力, 2001, 34(11): 38-41.
- [6] 郭瑞. 微网短期负荷预测中的白噪声分离[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2010.
- [7] 胡昊明, 郑伟, 徐伟, 等. Prony 和 HHT 算法在低频振荡在线辨识中的适用性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 33-40.
- [8] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2010.

作者简介：

- 胡昊明(1987), 男, 江苏南京人, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;
- 江叶峰(1976), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理;
- 葛亚明(1984), 男, 安徽宣城人, 工程师, 研究方向为电力调度运行管理;
- 尤伟(1983), 男, 江苏扬州人, 工程师, 研究方向为电力系统调度及其自动化;
- 张宁宇(1985), 男, 山西五台人, 工程师, 研究方向为电力系统规划与运行。

The Application of EMD-based Prony Algorithm in Power Grid Fault Analysis

HU Haoming¹, JIANG Yefeng², GE Yaming², YOU Wei², ZHANG Ningyu¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Jiangsu Electric Power Dispatching and Control Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: With the DSA system, Jiangsu Electric Power Dispatching and Control Center implemented an after-fault analysis. Compared PMU-recorded data with simulation curve, it is discovered that random noise in the PMU data, introduced during the process of measuring, transmission and conversion etc., may significantly affect the precision of Prony analysis. This paper proposes a noise characteristic based EMD which can be used as a pre-filter algorithm in Prony analysis. This algorithm reduces the power of noise through random sort iterations, and thus increases the signal-noise-ratio of the reconstructed signal. Therefore, the noise in the signal can be filtered effectively within several loops. The comparison between a test signal and a real fault in of Jiangsu power grid proved the effectiveness and practicability of the proposed algorithm.

Key words: random noise; statistical characteristic; EMD de-noising; prony algorithm