

基于 Prony 滑动平均窗算法的电力系统低频振荡特征分析

张俊峰¹, 杨婷², 陈珉², 张甜甜², 萧璐², 毛承雄²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: Prony 算法能根据实测数据辨识系统的相关特性参数, 有助于分析系统低频振荡。针对传统 Prony 算法只能分析部分数据且对噪声敏感的问题, 提出一种 Prony 滑动平均窗算法, 分窗口对数据进行分析, 不仅能充分利用数据, 而且采用求和取平均的方法在一定程度上能削弱噪声, 即使在信噪比非常小的情况下仍能得到准确的辨识结果。基于 PSASP 软件的仿真分析验证了 Prony 滑动平均窗算法所得结果的准确性。

关键词: 电力系统; 低频振荡; Prony 算法; 滑动平均窗; 信噪比

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.028

0 引言

互联的发电机组之间, 当发电机转子发生相对摇摆引发联络线输送功率或者电压的振荡时, 若系统缺乏阻尼, 振荡将会持续, 振荡频率一般比较低, 在 0.1~2.5 Hz 之间^[1-2], 该低频振荡会对系统的正常运行造成影响。目前分析低频振荡的方法有多种, Prony 方法能根据相量测量装置 (PMU) 的实测数据进行分析, 辨识系统的幅值、衰减因子、频率以及相位等信息, 并且运用简单、可靠, 因此其在众多算法中脱颖而出。

目前国内外学者对 Prony 算法的研究已经非常成熟, 文献[3-5]介绍了 Prony 算法的相关原理及其在分析低频振荡时的优势。由于 PMU 能提供实时数据使得对系统的分析更可靠, 因此近年来对 PMU 的应用越来越多^[6-7], 我国 PMU 的实时传送速率具有 25 次/s、50 次/s 和 100 次/s 的可选速率^[8]。Prony 算法分析低频振荡时的采样频率一般取为 10 Hz 左右^[9], 如果其采样周期太小, 则方程组容易出现病态, 从而得到的结果不准确或者错误; 如果采样周期太大, 则方程组包含的信息偏少, 没有充分利用数据。另外, 传统 Prony 算法还存在对噪声敏感的问题。文献[10]采用了小波预处理技术先对数据进行滤波处理, 文献[11-12]对 Prony 算法进行了改进, 以上改进算法均能提高 Prony 算法分析的精度, 但在分析较多采样数据点时, 上述算法只能选择部分数据进行分析, 不能充分利用采样信号。文献[13]提到在求解复极点模型时, 窗口滑动技术能准确区分实际信号与噪声, 从而降低噪声对实际信号的影响, 而且窗口滑动能充分利用实测数据。文献[14]采用了 Prony 滑动窗算法对低频振荡进行识别, 与传统 Prony 算法相比, 采用窗口滑动处理所得结果更准确, 但其基本原理与传统 Prony 算法相同, 依然存在对噪声敏感的问题。而 PMU 实测数据中部分噪声很难消除, Prony 普通滑动窗算法在信噪比

较大时能准确辨识系统的特征参数, 但是在信噪比较小结果误差比较大。

本文提出一种 Prony 滑动平均窗算法, 分窗口对数据进行分析, 不仅能充分利用数据, 而且采用求和取平均的方法在一定程度上能削弱噪声, 即使在信噪比非常小的情况下仍能准确辨识系统参数又不掩盖信号的时变信息。

1 Prony 算法的基本原理

Prony 算法是一种用指数函数的线性组合来描述等间距采样数据的模型^[11, 15-16], 假设模型是由一组衰减的正弦分量组成, 即:

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

其中, A_i 为振幅; θ_i 为相位, 单位为 rad; α_i 为衰减因子; f_i 为振荡频率, 单位为 Hz; L 为阶数。利用欧拉公式将式(1)写成指数形式, 可得 N 个采样点估计值的离散时间函数, 如式(2)所示。

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^L b_i z_i^n \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中, b_i 和 z_i 假定为复数, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} b_i = A_i \exp(j\theta_i) \\ z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i) \Delta t] \end{cases} \quad (3)$$

其中, Δt 为采样间隔。因此可求得系统的 4 个特征指标, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} a_i = \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i = \arctan[\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)] / (2\pi \Delta t) \\ A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i) / \text{Re}(b_i)] \end{cases} \quad (4)$$

2 Prony 滑动平均窗算法

2.1 Prony 普通滑动窗算法

令 k 为滑动次数, 根据式(2)及公式推导可得递推的差分方程:

$$\hat{x}(n+k) = -\sum_{i=1}^L \alpha_i \hat{x}(n+k-i) \quad L \leq n \leq N-1 \quad (5)$$

定义实际数据 $x(n)$ 与拟合数据 $\hat{x}(n)$ 之间的误差为 $e(n)$, 则有:

$$x(n) = \hat{x}(n) + e(n) \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (6)$$

联立式(5)、(6)可得每次窗口滑动时有:

$$x(n+k) = -\sum_{i=1}^L \alpha_i x(n+k-i) + \varepsilon(n+k) \quad (7)$$

其中, $\varepsilon(n+k) = \sum_{i=0}^L \alpha_i e(n+k-i)$ 。一般求取 α_i 时, 利用最小二乘法使得 $\sum_{n=p}^{N-1} |\varepsilon(n+k)|^2$ 最小, 由于此方法求解复杂且不稳定^[17], 因此直接令 $\varepsilon(n+k) = 0$, 根据式(7)可得求解 α_i 的方程组为:

$$\begin{bmatrix} x(L-1+k) & x(L-2+k) & \cdots & x(k) \\ x(L+k) & x(L-1+k) & \cdots & x(1+k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-2+k) & x(N-3+k) & \cdots & x(N-L-1+k) \end{bmatrix} \alpha = \begin{bmatrix} x(L+k) \\ x(L+1+k) \\ \vdots \\ x(N-1+k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_L]^T$$

一般取 $N > 2L$ 。由式(8)求得 α_i 的估计值后, 即可根据特征方程式(9)求得特征根。

$$1 + \alpha_1 z^{-1} + \cdots + \alpha_L z^{-L} = 0 \quad (9)$$

窗口每滑动一次对应一组 α_i 和 z_i , 由式(10)可求得相应的 b_i 。

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(1+k) \\ \hat{x}(2+k) \\ \vdots \\ \hat{x}(L+k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_L \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_L^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

因此每次窗口滑动都能得到一组该滑动窗所取数据对应的特征信息 A_i 、 θ_i 、 α_i 和 f_i 。

2.2 Prony 滑动平均窗算法

假设滑动窗每次滑动时间为 w , 大窗口滑动 w 时, 在内部又进行小窗口时间为 t 的滑动(小窗口的窗口长度跟大窗口长度相同, 均为 M), 然后将小窗口移动 $w/t-1$ 次, 加上最开始的点, 一共得到 w/t 次的结果, 再将 w/t 组结果进行求和取平均。这样不仅可以充分利用 PMU 采集的数据, 同时也能削弱噪声, 从而得到更为理想的结果。其原理示意图如图 1 所示。图中, N_N 为分析数据总点数(滑动间隔时间为 w); M 为滑动窗长度。

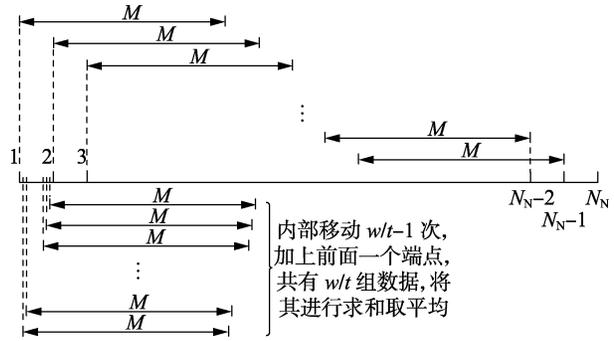


图 1 Prony 滑动平均窗算法原理示意图

Fig.1 Principle of Prony moving average window algorithm

令 i 为小窗口移动的次數, 则大窗口每移动一次, 根据式(9)可得内部小窗口移动的过程为:

$$\begin{cases} 1 + \alpha_{(0)1} z^{-1} + \alpha_{(0)2} z^{-2} + \cdots + \alpha_{(0)L} z^{-L} = 0 \\ 1 + \alpha_{(1)1} z^{-1} + \alpha_{(1)2} z^{-2} + \cdots + \alpha_{(1)L} z^{-L} = 0 \\ \vdots \\ 1 + \alpha_{(d-1)1} z^{-1} + \alpha_{(d-1)2} z^{-2} + \cdots + \alpha_{(d-1)L} z^{-L} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $d = w/t$ 。将式(11)中 d 个方程相加取平均值得:

$$1 + \frac{\sum_{i=0}^{d-1} \alpha_{(i)1}}{d} z^{-1} + \frac{\sum_{i=0}^{d-1} \alpha_{(i)2}}{d} z^{-2} + \cdots + \frac{\sum_{i=0}^{d-1} \alpha_{(i)L}}{d} z^{-L} = 0 \quad (12)$$

在滑动过程中, 系统的信息特征基本不变, 即系统的特征根是式(11)中 d 个方程的公共解, 因此主导根应该也是系数求和取平均值之后方程的解。而且, 由于是对特征值的系数进行求和再取平均值, 这样不会影响信号的时变信息。

根据式(12)求得特征根后, 将其代入式(13), 即可求得每次移动小窗口时对应的矩阵 b 。

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(1+i) \\ \hat{x}(2+i) \\ \vdots \\ \hat{x}(L+i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_L \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_L^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{(i)1} \\ b_{(i)2} \\ \vdots \\ b_{(i)L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

矩阵 b 中包含了幅值与相位信息, 需先进行相位补偿再相加, 如式(14)所示。

$$b_j = \frac{1}{d} \sum_{i=0}^{d-1} b_{(i)j} z_j^{-i/d} \quad (14)$$

联立式(12)、(14)以及式(4)即可求得平均后的 A_i 、 θ_i 、 α_i 和 f_i 这 4 项系统指标。

3 Prony 滑动平均窗参数的选择

a. 采样频率的选择。

根据 Nyquist 采样定理, 采样频率应该大于信号最高频率的 2 倍, 从而避免频谱发生混淆, 同时采样频率不宜过高否则会使得运算数据点过多, 计算量

非常大,计算时间过长。由于低频振荡的频率一般为 0.1~2.5 Hz,分析中保留 5 Hz 以下的频率信息,一般将采样频率定为 10 Hz。

b. 滑动时间窗长度的选择。

滑动时间窗长度的选择将直接影响结果的准确性,若滑动时间窗长度过小,则会使信息丢失,分析结果出现较大误差,一般认为滑动时间窗长度至少应包含 2 个最低频率的振荡周期;若滑动时间窗长度过长,则将增加计算量,使得计算效率降低,一般取 5~20 s 的时间长度进行分析^[18]。在满足要求的范围内,滑动时间窗长度越短,则系统更接近线性,更适合采用 Prony 算法进行分析。在对算法进行试验时,得到滑动时间窗长度选择在 6 s 左右时比较合适,因此本文钟滑动时间窗长度均定为 6 s, Prony 滑动平均窗算法中大窗口与小窗口的长度一致。

c. 模型阶数的选择。

采用奇异值分解法求取系统模型阶数能够考虑不同系统特性下主导振荡模式的数量^[19],同时模型阶数最佳选取范围为采样点总数的 0.35~0.45^[20]。由于一定范围内阶数越大,拟合效果相对更优,因此本文综合 2 种方法,取两者计算得到的较大值作为系统的模型阶数。

d. 滑动窗移动时间的选择。

由于 Prony 算法的采样频率为 10 Hz,因此将大窗口移动时间定为 0.1 s,为了使数据得到充分的利用,内部小窗口的移动时间定为原始数据的采样间隔,这样能使原始数据全部得到应用,本文中 Prony 滑动平均窗算法的小窗口移动时间为 0.01 s。

4 算例分析

4.1 Prony 普通滑动窗算法与 Prony 滑动平均窗算法对理想数据分析的对比

4.1.1 在理想数据中加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声

给定一个包含 2 个主导模式的已知信号,如式 (15) 所示。

$$x(t) = 2.2e^{-0.15t} \cos(2\pi \times 1.5t + \pi) + 1.5e^{-0.1t} \cos(2\pi \times 0.5t + \pi/2) \quad (15)$$

假设电力系统稳定运行时,随机投切负荷引起的扰动为白噪声^[21],因此在给定信号式 (15) 中加入信噪比为 20 dB 的白噪声,得到信号波形图如图 2 所示。

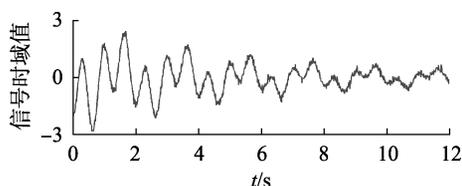
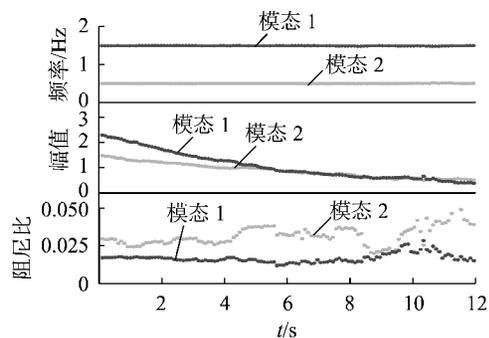


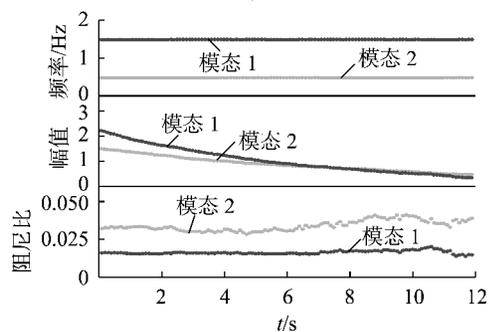
图 2 信噪比为 20 dB 的信号波形

Fig.2 Signal waveform with SNR of 20 dB

对图 2 中的信号分别进行 Prony 普通滑动窗算法和 Prony 滑动平均窗算法分析,2 种算法的滑动时间窗长度均定为 6 s,阶数为 20,大窗口移动时间均为 0.1 s,得到的结果如图 3 所示。



(a) Prony 普通滑动窗算法



(b) Prony 滑动平均窗算法

图 3 信噪比为 20 dB 时 2 种算法辨识结果对比

Fig.3 Comparison of identification results between two algorithms when SNR is 20 dB

该算例中 Prony 普通滑动窗算法的计算时间为 0.4 s, Prony 滑动平均窗算法的计算时间为 0.7 s。由于 Prony 滑动平均窗算法在大窗口内对小窗口滑动得到的特征根系数进行求和取平均,所以其耗时会长一些,但只是增加了简单的运算,所以耗时增加不多。由图 3 可知,当加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声时,2 种算法均能得到准确的辨识结果。

4.1.2 在理想信号中加入信噪比为 10 dB 的高斯白噪声

在给定信号式 (15) 中加入信噪比为 10 dB 的高斯白噪声,得到的信号波形如图 4 所示。

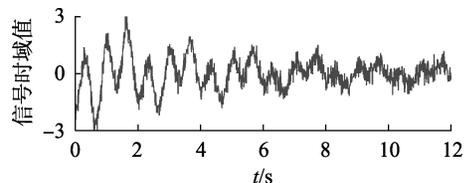


图 4 信噪比为 10 dB 的信号波形

Fig.4 Signal waveform with SNR of 10 dB

对图 4 中的信号分别进行 Prony 普通滑动窗算法和 Prony 滑动平均窗算法分析,2 种算法的参数设置相同,得到的结果如图 5 所示。

该算例中 Prony 普通滑动窗算法的计算时间为

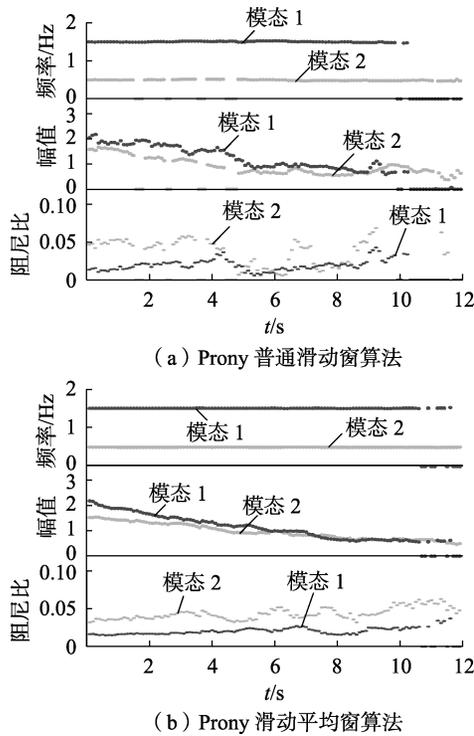


图 5 信噪比为 10 dB 时 2 种算法辨识结果对比

Fig.5 Comparison of identification results between two algorithms when SNR is 10 dB

0.4 s, Prony 滑动平均窗算法的计算时间为 0.8 s, 2 种算法的计算耗时差别不大。从图 5 可明显看出, 当加入信噪比为 10 dB 的高斯白噪声时, Prony 普通滑动窗算法得到的结果受噪声影响很大, 基本不能准确显示主导模态, 而 Prony 滑动平均窗算法仍然能够准确辨识系统的特征信息, 一段时间后由于信号衰减, 在噪声的干扰下导致出现频率为 0 的模态, 但是前期结果非常准确, 而 Prony 普通滑动窗算法在分析前期结果已经出现错误。这是因为 Prony 滑动平均窗算法对多次内部滑动的结果进行求和取平均, 在一定程度上削弱了噪声, 起到了滤波的效果, 提高了主导模态的主导地位。

4.2 IEEE 3 机 9 节点系统

基于 PSASP 软件搭建 IEEE 3 机 9 节点系统^[22], 考虑如下扰动: 20 s 时负荷 1 和负荷 4 各切除 10%, 持续时间为 0.1 s, 仿真时间为 60 s, 将机组 2 的有功功率作为输出。基于仿真数据, 采用 PSASP 软件中的 Prony 算法分析得到的主导模态为参照, 结果如表 1 所示。

为了研究 Prony 滑动平均窗算法和 Prony 普通滑动窗算法对实际系统的抗噪性, 在机组 2 的有功输出中添加信噪比为 60 dB 的高斯白噪声, 利用 Prony 普通滑动窗算法和 Prony 滑动平均窗算法分别对加入噪声后的信号进行分析。2 种算法的滑动窗长度均设为 6 s, 通过奇异值分解法求得该系统模型阶数为 4 阶, 但采用 4 阶模型进行计算时精度太

表 1 IEEE 3 机 9 节点系统辨识结果对比

Table 1 Comparison of identification results for IEEE 3-machine 9-bus system

噪声	辨识方法	模态	衰减因子	频率/Hz	阻尼比
不含噪声	PSASP 辨识结果	1	-0.223 3	0.624 3	0.056 8
	Prony 滑动平均窗算法	1	-0.223 3	0.624 3	0.056 8
加入 60 dB 白噪声	Prony 滑动平均窗算法	2	-0.538 0	1.097 7	0.077 7
	Prony 普通滑动窗算法	1	-0.219 5	0.625 2	0.055 8
	Prony 普通滑动窗算法	2	-0.563 8	1.112 8	0.080 4
	Prony 普通滑动窗算法	1	-0.197 3	0.621 6	0.050 5
		2	-2.200 7	1.025 0	0.323 3

低, 因此阶数选为采样点数的 0.37, 即 22 阶。得到的结果如表 1 所示, 表 1 中结果按能量大小排序。

该算例中 Prony 普通滑动窗算法的计算时间为 0.7 s, Prony 滑动平均窗算法的计算时间为 1.2 s。通过表 1 中结果的对比可知, 不含噪声时 Prony 滑动平均窗算法的辨识结果非常准确, 说明 Prony 滑动平均窗算法适用于分析 IEEE 3 机 9 节点系统。加入 60 dB 的高斯白噪声后, 对于模态 1 而言, 与 Prony 普通滑动窗算法相比, Prony 滑动平均窗算法在相同噪声强度下的辨识结果更准确; 对于模态 2 而言, Prony 普通滑动窗算法辨识得到的衰减因子和阻尼比出现错误, 而 Prony 滑动平均窗算法得到的结果仍然准确。

4.3 新英格兰 10 机 39 节点系统

基于 PSASP 软件搭建新英格兰 10 机 39 节点系统^[22], 考虑如下扰动: 3 s 时负荷 3 切除 10%, 持续时间为 0.1 s, 仿真时间为 30 s, 将机组 8 的有功功率作为输出。基于仿真数据, 采用 PSASP 软件中的 Prony 算法分析得到的主导模态为参照, 结果如表 2 所示。

表 2 新英格兰 10 机 39 节点系统辨识结果对比

Table 2 Comparison of identification results for New England 10-machine 39-bus system

噪声	辨识方法	模态	衰减因子	频率/Hz	阻尼比
不含噪声	PSASP 辨识结果	1	-0.353 4	0.829 9	0.067 6
	Prony 滑动平均窗算法	2	-0.186 2	1.215 9	0.024 3
加入 55 dB 白噪声	Prony 普通滑动窗算法	1	-0.360 9	0.827 8	0.069 2
	Prony 普通滑动窗算法	2	-0.189 6	1.214 8	0.024 8
	Prony 普通滑动窗算法	1	-0.387 9	0.832 9	0.073 9
	Prony 普通滑动窗算法	2	-0.212 1	1.222 9	0.027 6
		1	-0.476 6	0.836 2	0.090 3
		2	-2.395 0	0.560 1	0.562 6

在机组 8 的有功输出中加入信噪比为 55 dB 的高斯白噪声, 在相同参数设置条件下利用 Prony 普通滑动窗算法和 Prony 滑动平均窗算法分析加入噪声后的信号, 得到的主导模态如表 2 所示, 表 2 中结果按能量大小排序。

Prony 普通滑动窗算法的计算时间为 0.7 s, Prony 滑动平均窗算法的计算时间为 1.7 s。由表 2

的辨识结果可知,不含噪声时 Prony 滑动平均窗算法对新英格兰 10 机 39 节点系统的辨识结果非常准确,说明 Prony 滑动平均窗算法适用于分析新英格兰 10 机 39 节点系统。加入 55 dB 的高斯白噪声后,对于模态 1 而言,与 Prony 普通滑动窗算法相比,Prony 滑动平均窗算法在相同噪声强度下的辨识结果更准确;对于模态 2 而言,Prony 普通滑动窗算法辨识得到的结果已经严重偏离实际值,而 Prony 滑动平均窗算法辨识所得结果仍然接近准确值。

由以上算例可知,在同等条件下对不同的系统,Prony 滑动平均窗算法与 Prony 普通滑动窗算法在计算耗时差别不大的情况下,前者所得结果更准确,抗噪性更强,因此 Prony 滑动平均窗算法更适用于分析系统的低频振荡。

5 结论

针对传统 Prony 算法不能充分利用 PMU 数据以及对噪声比较敏感的问题,本文提出了一种新的算法——Prony 滑动平均窗算法,通过算例验证了其能充分利用数据,即使在信噪比非常小的情况下,仍能通过分析较短的时间窗数据得到比较准确的结果,且计算耗时不大。通过仿真验证了 Prony 滑动平均窗算法比 Prony 普通滑动窗算法的抗噪性更好,辨识结果更准确。

参考文献:

- [1] 董航,刘涤尘,邹江峰. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析[J]. 高电压技术,2006,32(6):97-100.
DONG Hang, LIU Dichen, ZOU Jiangfeng. Analysis of power system low frequency oscillation based on Prony algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 97-100.
- [2] AMANO M, WATANABE M, ANJO M. Self-testing and self-tuning of power system stabilizers using Prony analysis[J]. IEEE Power Delivery, 1998, 18(5): 38-47.
- [3] 王家林,夏立,吴正国,等. 采用改进 Prony 算法的电力系统故障暂态信号分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):89-93,98.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Analysis of power system transient signal based on improved Prony algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 89-93, 98.
- [4] 田立峰,李成鑫,刘俊勇. 电网低频振荡在线可视化监视的理论和实现[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):28-33.
TIAN Lifeng, LI Chengxin, LIU Junyong. Theory and implementation of visualized online low-frequency oscillation monitoring [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 28-33.
- [5] MA J, ZHANG P, FU H, et al. Application of phasor measurement unit on locating disturbance source for low-frequency oscillation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 340-346.
- [6] 张伯明,孙宏斌,吴文传,等. 智能电网控制中心技术的未来发展[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):21-28.
ZHANG Boming, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Future development of control center technologies for smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 21-28.
- [7] 郭成,李群湛,王德林. 互联电力系统低频振荡的广域 Prony 分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):69-73.
GUO Cheng, LI Qunzhan, WANG Delin. Wide-area Prony analysis of low frequency oscillation in interconnected power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 69-73.
- [8] 中国南方电网公司系统运行部. 南方电网相量测量装置(PMU)规范化管理指导手册[S]. [S.1.]: 中国南方电网公司,2012.
- [9] 熊俊杰. 基于 PMU 的低频振荡 Prony 分析和本地在线监测系统[D]. 南京:东南大学,2006.
XIONG Junjie. Prony analysis of electromechanical oscillation based on PMU and local online supervisory system [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [10] 刘森,赵书强,于赞梅,等. 基于小波预处理技术的低频振荡 Prony 分析[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):64-67,82.
LIU Sen, ZHAO Shuqiang, YU Zanmei, et al. Prony analysis of low frequency oscillation based on wavelet pretreatment technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 64-67, 82.
- [11] 竺炜,唐颖杰,周有庆,等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术,2009,33(5):44-47,53.
ZHU Wei, TANG Yingjie, ZHOU Youqing, et al. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 44-47, 53.
- [12] 马燕峰,赵书强,刘森. 基于多信号 Prony 算法的低频振荡在线辨识[J]. 电网技术,2007,31(15):44-49.
MA Yanfeng, ZHAO Shuqiang, LIU Sen. Online identification of low-frequency oscillations on improved multi-signal Prony algorithm [J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 44-49.
- [13] GOMEZM R, CARRION P N C. Extended Prony method applied to noisy data [J]. Electric Letters, 1986, 22(11): 613-614.
- [14] 丁蓝,薛安成,李津,等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):24-28.
DING Lan, XUE Ancheng, LI Jin, et al. A moving-window Prony algorithm for power system low frequency oscillation identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 24-28.
- [15] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1995:74-79.
- [16] 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.
WANG Tieqiang, HE Renmu, XU Dongjie, et al. The validity study of Prony analysis for low frequency oscillation in power system [J]. Electric Power, 2001, 34(11): 38-41.
- [17] KAMEL N, SANKARAN P, VENKATESH B. Fault-current pre-determination using time-limited CT secondary side measurements by the covariance-Prony method [J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(6): 735-739.
- [18] KUMARESAN R, FENG Y. FIR prefiltering improves Prony's method [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(3): 736-741.
- [19] 熊俊杰,邢卫荣,万秋兰. Prony 算法的低频振荡主导模式识别[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008,38(1):64-68.
XIONG Junjie, XING Weirong, WAN Qiulan. Identification of control modes in low frequency oscillation analysis by Prony method [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(1): 64-68.
- [20] 赵杰,王宇,朱铁林,等. 能量排序 Prony 算法在电力系统低频振荡参数辨识中的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(9):192-195.
ZHAO Jie, WANG Yu, ZHU Tielin, et al. Application of energy-sorted Prony algorithm in parameter identification of low frequency oscillations for power systems [J]. Water Resources and Power, 2015,

33(9):192-195.

- [21] 陈刚,段晓,张继红,等. 基于 ARMA 模型的低频振荡模式在线辨识技术研究[J]. 电网技术,2010,34(11):48-54.
CHEN Gang, DUAN Xiao, ZHANG Jihong, et al. A new approach for online identification of low frequency oscillation modes based on auto-regressive moving-average model [J]. Power System Technology, 2010, 34(11):48-54.
- [22] 徐东杰. 互联电力系统低频振荡分析方法与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
XU Dongjie. Analysis and control of low frequency oscillations in interconnected power systems [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.

作者简介:



张俊峰

张俊峰(1978—),男,湖北襄阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为发电机励磁系统以及电力系统稳定器控制技术(E-mail: flyleaf170@126.com);

杨婷(1991—),女,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为发电机励磁系统(E-mail: tingyang@hust.edu.cn);

陈珉(1993—),男,湖北随州人,硕士研究生,研究方向为全控器件励磁。

Power system low-frequency oscillation characteristic analysis based on Prony moving average window algorithm

ZHANG Junfeng¹, YANG Ting², CHEN Min², ZHANG Tiantian², XIAO Jun², MAO Chengxiang²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Prony algorithm can identify related characteristic parameters of power system according to the measured data, which can help to analyze the low-frequency oscillations of the system. However, the traditional Prony algorithms are sensitive to noise and can only analyze partial of the data. A Prony moving average window algorithm is proposed to analyze the data in separate windows, which can not only make full use of the data, but also weaken the noise and obtain correct identification results even if the SNR (Signal-to-Noise Ratio) is very small. The simulative results based on PSASP software verify the accuracy of the Prony moving average window algorithm.

Key words: electric power systems; low-frequency oscillation; Prony algorithm; moving average window; SNR

(上接第 171 页 continued from page 171)

作者简介:

张斯淇(1991—),女,黑龙江富裕人,硕士研究生,主要研究方向为输电线路故障测距(E-mail: hitzhangsiqi@163.com);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: lytju@163.com);



张斯淇

陈晓龙(1985—),男,河南濮阳人,讲师,博士,主要研究方向为含分布式电源配电网以及微电网的保护与控制(E-mail: promising1207@163.com)。

Novel fault location algorithm for mixed lines based on fault section fast identification

ZHANG Siqi, LI Yongli, CHEN Xiaolong

(Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel fault location algorithm for overhead-cable mixed lines based on fault section fast identification is proposed. The fault section is determined according to the phase characteristics of fault section recognition function at the line connection points, and then the fault distance on the fault section is calculated precisely by using the fault distance expression deduced by the positive-sequence fault location equation of mixed lines. The proposed algorithm does not need to judge the fault type, it has no dead-zone when the fault section is near the line connection points. No iterative search and pseudo-root recognition are required during fault location, and the proposed algorithm has small calculation amount and is easy to be programmed. Simulative tests show that the proposed algorithm is not affected by such factors as fault location, transition resistance and load current, and satisfies the engineering requirements for accuracy.

Key words: mixed lines; fault location; fault section recognition function; phase characteristics