

基于改进Prony算法的华中电网低频振荡在线监测分析系统研究

随着电力系统的规模迅速增大，电网大区直接的互联规模也随之不断增强，因此低频振荡问题越来越成为影响电网安全稳定运行的主要因素之一。华中电网作为国内管辖人口最多的区域电网，不但承担着辖区内的电力供应工作，同时也承担着华东、华北等地区电力保障的任务，因此，保证华中电网的正常运行十分重要。依托目前电网低频振荡的主流分析方法Prony算法，进行了基于Prony算法的在线低频振荡监测分析系统的设计和研究，并根据实践提出包括离散傅里叶变换预处理在内的一些改进和优化措施，最后提出了模式识别等新的应用思路，对该系统的进一步应用进行了展望。

王 健 于文娟 汤卫东/国家电网华中电力调控分中心
陶 玮 王功涛/北京科东电力控制系统有限公司

0 引言

电力系统的低频振荡属于电力系统动态小干扰稳定性问题，对于其发生的原因，主流的观点是在电力系统中，发电机并列运行时，扰动下发生的电机转子间的相对摇摆，在缺乏阻尼时引起的持续振荡，频率主要在0.2~2.5 Hz之间。低频振荡大致有两类表现形式，即局部振荡模式和区间振荡模式。局部振荡模式是电气距离较近的局部系统内的发电机之间的振荡，其频率范围为0.7~2.5 Hz，这种振荡局限于区域内，相对影响范围较小。另外一种为区间振荡模式，频率范围在0.2~0.7 Hz之间，其是系统的发电机群相对于电气距离较远的通过联络线传递的振荡，这种振荡危害性较大，一经发生会通过联络线向全系统传播。低频振荡现象对电网危害极大，如系统阻尼不足，可能导致

增幅振荡，使得保护装置动作，网络解列，甚至由此导致整个系统的崩溃。因此，如何在电网实时监控工作中及时发现电力系统中的低频振荡现象，找出原因，并采取相应的控制措施，是十分必要的工作^[1-3]。目前，低频振荡研究主要分为基于系统数学模型的分析方法和基于系统实测信号的分析方法两种。基于系统数学模型的分析方法主要包括复频域法、时域仿真法和基于正规形理论的分析方法等，这些方法对于日趋复杂化、大型化的电力系统有着自身的局限性，其仿真量大、计算时间长等缺点决定了其不适合作为在线分析系统的分析方法。而随着同步测量技术广域量测装置WAMS在电力系统中的推广应用，电网中的电压、电流、功率和功角等数据能够以很小的分辨率进行量测和传输，基于实测信号的分析方法在近年来迅速的发展应用。文献[4-6]研究了很多种关于电网低频振荡的实测信号分析方法。快速傅里叶变换是一种对于所有绝对可积的信号的传统、成熟并且可信度较高的频域分析方法。快速傅里叶变换的准确性取决于数据窗口的选择，并且这个方法不能反映振荡的阻尼和暂态特性。小波分析法是一个综合了时域和频域的分析方法，具有可变的时域和频域窗口。这个方法提供了信号的时—频谱，适用于暂态的和稳定的信号分析。但是小波分析法难以确定基波的大小，拟合准确度较差。HHT (Hilbert—Huang Transform) 法由经验模态分解



王 健/高级工程师

关键词/Keywords

低频振荡 ·
Prony算法 ·
在线监测分析系统 ·
模式识别 ·

(Empirical Mode Decomposition, EMD) 和 Hilbert变换 (HT) 两部分组成, 其核心部分是经验模态分解。非平稳振荡数据通过HHT变换后, 能从中准确地提取动态振荡特性以及系统故障暂态信息, 并能有效反映出低频振荡中的非线性振动模式。但是该方法存在端点效应, 实时性稍差, 且难以将复杂信号中相近的频率分解为独立的分量。Prony分析是一个将信号分解为指数方程的线性组合来拟合采样信号的方法, 通过时域信号的分析得出信号模型的频率、衰减 (或者阻尼)、幅值和相位^[7]。Prony算法近年来已经广泛应用于大型动态系统的识别中, 但是也逐步暴露出其抗噪能力弱以及难以确定阶数等缺点。本文将探讨如何减少Prony算法的缺点和不足, 并在此基础上, 构建基于华中电网的广域量测WAMS系统为数据源的电网低频振荡在线监测分析系统。

2 Prony分析

2.1 Prony算法

Prony算法通过采用指数函数的线性组合拟合低频振荡信号, 从而得到低频振荡相关的频率、阻尼等信息, 其结果可以进行PSS参数整定、HVDC小信号调制的参数整定以及通过模式识别方法进行电网故障的定位和诊断等多种应用。

实际输入信号 $\hat{x}(n)$ 可按照下式建模, 即

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n, \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

其中

$$b_m = A_m e^{j\theta_m} \quad (2)$$

$$z_m = e^{(a_m + j2\pi f_m)\Delta t} \quad (3)$$

式中, A_m 为振幅; θ_m 为相位; 角速度 $\omega = 2\pi f$; 阻

尼比 $\xi = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}$ 。

根据扩充Prony算法, 构造扩充相关系数矩阵为

$$\mathbf{R}_e = \begin{pmatrix} r(0,1) & r(1,1) & \cdots & r(1,p_e) \\ r(2,0) & r(2,0) & \cdots & r(2,p_e) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(p_e,0) & r(p_e,1) & \cdots & r(p_e,p_e) \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中

$$r(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j)x^*(n) \quad (5)$$

最小误差能量为

$$\varepsilon_p = \sum_{m=0}^p a_m \left[\sum_{n=p}^{N-1} x(n-m)x^*(n) \right] \quad (6)$$

使用SVD-TLS算法来确定相关矩阵 $\mathbf{R}_e$ 的有效秩, 以及TLS估计获得系数 $a_1, a_2, \dots, a_p$, 然后得到特征方程, 即

$$\varphi(z) = z^p + a_1 z^{p-1} + \cdots + a_{p-1} z + a_p = 0 \quad (7)$$

得到根 $z_i (i=1, \dots, p)$ 。

令

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (8)$$

系数为

$$\mathbf{b} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{\mathbf{x}} \quad (9)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

系数 $\mathbf{b}$ 可以通过式 (8)、式 (9) 和式 (10) 获得。代入特征根 $z_i (i=1,2,\dots,p)$ 到式 (3) 中, 得出式 (1) 的解。

衰减因子为

$$a_i = \ln(z_i) / \Delta t \quad (11)$$

衰减频率为

$$f_i = \arctan \frac{\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)}{2\pi\Delta t} \quad (12)$$

振幅为

$$A_i = |b_i| \quad (13)$$

相位为

$$\theta_i = \arctan \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \quad (14)$$

2.2 Prony算法的参数选择

Prony方法的拟合结果与效率和参数的选择有很大的关系, 参数选择不当, Prony算法很有可能无法得到拟合结果, 或者得到错误的结果。

1) 采样频率。根据奈奎斯特采样定理, 采样

频率大于信号最高频率的两倍时,就可以完全还原信号本身,不会发生频谱混叠现象。鉴于低频振荡的主要研究频段为0.2~2.5 Hz,采用频率至少应大于最低采样频率5 Hz。而在实际应用中,为了保留一定的裕度,可以按照4倍最高频率(10 Hz)进行采样,采样周期为0.1 s。更高的采样频率没有必要,反而会影响计算规模和效率,甚至导致拟合结果变差。华中电网现有的WAMS系统的采样频率为50 Hz,采样周期为0.02 s,完全能够满足低频振荡分析研究的需求。

2) 时间长度。一般来说,采样时间长度应至少包含两个周期最低频率的振荡,按照0.2~2.5 Hz来计算为10 s左右,在对实际信号的计算当中发现,更长的时间长度没有必要,因为过长的时间长度会使得衰减快的分量无法辨识,并且新出现的振荡分量会影响到之前振荡的拟合和分析,导致错误的分析甚至无法进行Prony拟合。

3) 模型阶数。模型阶数的选择决定了Prony算法的准确度和计算效率,电力系统动态过程中的系统阶数非常高,因此只能使用降阶的近似模型进行拟合。通常的方法有经验法和迭代法。常用的经验法是选取初始阶数 L ,使其远大于信号实际包含的指数项个数,得到 L 个指数项分量。然后从这 L 个指数分量中,选取 n 个分量的最优子集,使得这 n 个指数项分量和实际值的误差小于设定的误差阈值。本文的第三部分将提出一种简单的确定模型阶数的方法,在实际应用中已经得到验证。

2.3 Prony算法的性能评价

(1) 信噪比SNR

信噪比是衡量信号中噪声和信号能量大小的参数,通常在不影响系统的运行效率和运行成本的前提下,越大越好。

$$\text{SNR} = 20 \times \log \frac{R_0}{R_N} \quad (15)$$

其中,信号功率(方均根)为

$$R_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{0i}^2} \quad (16)$$

噪声功率(方均根)为

$$R_N = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - x_{0i})^2} \quad (17)$$

式中, x_0 为原始信号; x 为实际信号; n 为信号点数量。

(2) 误差百分比

误差百分比描述了Prony重建信号和原始信号的误差。通常越小越好。

$$\text{Err}\% = 100 \times \frac{\sum_{i=0}^{n-1} |x_i - x_{0i}|}{\sum_{i=0}^{n-1} |x_{0i} - x_{00}|} \quad (18)$$

式中, x_0 为原始信号; x 为实际信号; n 为信号点数量。

Prony算法的最大优点是适合在线应用,可以实时地辨识系统低频振荡的频率和幅值等。但是Prony算法主要依据实时采集的电网信号,其值难免受到数据的测量和传输过程中的噪声影响,这些噪声可能来自负荷的增减、发电出力的调整、开关的动作以及小干扰等,特别是新能源的广泛应用之后,其不稳定的输入产生的小干扰。这些噪声对Prony分析的结果会产生很大影响。另外,Prony分析法本质上是一种线性函数的拟合方法,然而电力系统是一个非线性的大系统,必须要注意在宏观尺度上非线性对拟合结果的影响。这些都是Prony算法在实际应用中必须注意和需要进一步改善的。

3 Prony算法在电网低频振荡在线监测分析系统的应用

随着我国智能电网建设的不断发展以及WAMS的广泛应用,电网监控系统能够更加及时、准确地采集到电网实时运行的各种信息,特别是智能电网控制调度系统D5000的广泛应用,将电网的各种运行参数进行集中采集和分析,为电网低频振荡在线检测分析系统的构建提供了有利的条件。

3.1 系统的总体处理流程

根据Prony算法的过程,对低频振荡在线监测分析系统的处理流程设计如图1所示。

以下将分模块介绍处理流程的每一个构成部

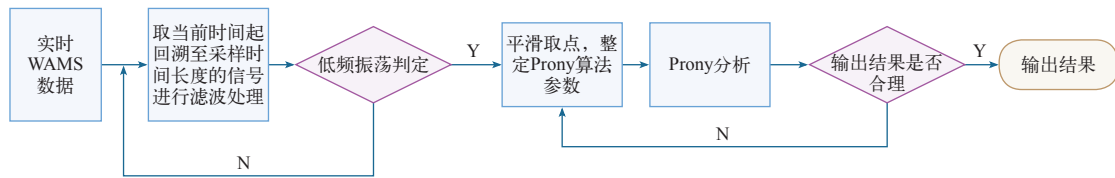


图1 电网低频振荡在线监测分析系统的处理流程

分。

3.2 WAMS数据接收模块

电网广域监测系统WAMS采用同步相角测量技术,通过逐步布局全网关键测点的同步相角测量单元(PMU),实现对全网同步相角及电网主要数据的高速率采集^[8]。系统首先实时接收储存来自WAMS的数据,华中电网目前配备的WAMS采样频率为50 Hz,采样周期为0.02 s,已经足够进行低频振荡的分析和处理,并且WAMS应用已经集成在智能电网调度管理系统D5000中,有着标准化的接口,能够简单、快速地进行数据采集和储存。

3.3 信号滤波模块和低频振荡判定模块

在接收储存的WAMS数据中,从当前时间前推一段设定好的数据,首先进行滤波处理,使用带通滤波器,去掉大部分噪声和直流分量,再进行低频振荡判定。高级的滤波方法如常用的卡尔曼滤波法等。而低频振荡的起振,由于相对稳定的电网本身状态分量被过滤掉,所以可以对给定时间跨越内的数据使用过零点检测方法,通过统计信号过平均线的次数,来确定振荡是否开始。时间间隔由下式确定,即

$$T_0 = \frac{2T_{\text{span}}}{N_c} \quad (19)$$

式中, T_0 为周期长度, s; T_{span} 为时间跨越长度, s; N_c 为过零次数。

3.4 Prony参数整定和分析模块

前文提到了Prony算法参数的确定,时间长度和采样频率相对比较好确定,时间长度可以按照最小频率0.2 Hz频段的周期(5 s)的两倍来进行整定,而由于WAMS的采样频率为50 Hz,需要对采集的数据进行二次平滑取点,也就是每隔5点取一

次数据来满足分析的需求。对于Prony算法的阶数确定问题,可以考虑一个简单的方法。考虑到振荡曲线的周期性,当式(5)中的*i*和*j*在整个采样期内变化时,在式(4)中 p_e 需要至少覆盖一个完整的基本时期。因此Prony的阶数可以由下式确定,即

$$p_e = \frac{T_0}{T_s} \quad (20)$$

式中, T_0 为周期长度, s; T_s 为信号周期, s; p_e 为Prony估计阶数。

Prony的核心算法基于C++语言实现,这是一种高效、应用范围极广的编程语言,也是智能电网调度控制系统D5000的核心语言。程序能够通过输入的数据进行分析,并且输出和算法相关的所有结果参数。

3.5 结果评价及输出

如3.3小节所述,可以采用几种评价参数来对拟合结果进行评价,如果拟合结果达不到设定的阈值,可以通过修改Prony参数等方式来优化拟合结果。

4 算例分析

4.1 算例数据来源

以华中电网2014年11月7日发生的一次电网低频振荡作为信号源,利用电网低频振荡在线监测系统进行分析。原始信号为长民一线的有功波动,如图2所示(信号总时长约为3 min)。

由图2可以看出,原始信号在初始值、噪声以及扰动的影响下振荡特征不够明显,所以首先要对信号进行初步的滤波处理,使用带通滤波器对信号进行简单处理,处理后信号如图3所示。

由图3可以看出,通过滤波处理以后的信号已经具有低频振荡的特征,并且数值被平均到0值附

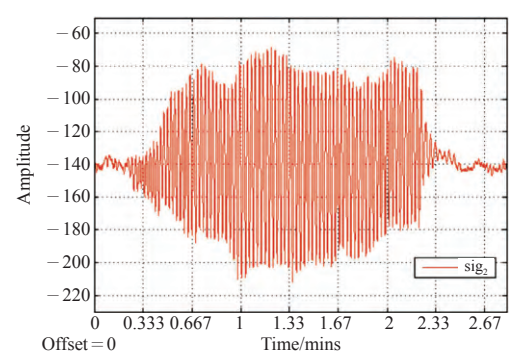


图2 长民一线有功低频振荡

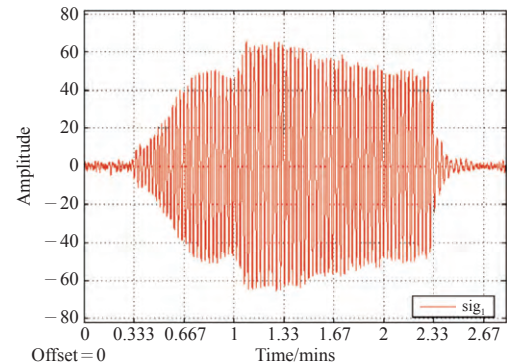


图3 滤波处理后的长民一线有功低频振荡

近，便于计算和分析。
接下来将取两个典型阶段进行Prony分析。

4.2 信号增强阶段

表1为该阶段的Prony分析的参数。从图4中可以看出，模式的分布较为集中，误差率和信噪比也在可以接受的范围内，说明Prony分析的结果可以很好地拟合实际结果。

表1 测试算例一的Prony分析结果

阶数	幅值	相位	衰减因子	衰减频率
3	27.905 1	125.608 2	0.0603	0.653 3
5	14.241 2	-4.963 9	-0.551 5	0.773 2
7	1.036	59.456 5	-0.829 6	1.802 9
9	2.091 5	-7.964 1	-1.402 9	2.827
11	5.096	75.277 5	-2.848 7	3.454 1
12	3.111 6	-180	-1.654 5	5
14	5.692 3	141.141 7	-2.693 7	4.270 1

4.3 振荡衰减阶段

表2列举了Prony分析的结果，各项参数也符合要求。

由表2和图5可以看出，在线系统能够很好

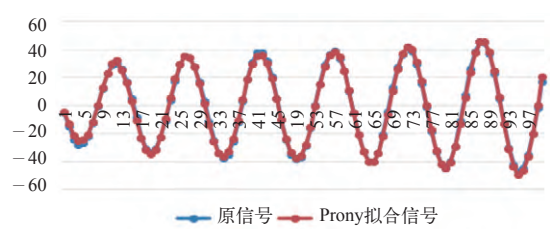


图4 Prony分析结果（增强阶段）

表2 测试算例二的Prony分析结果

阶数	幅值	相位	衰减因子	衰减频率
3	22.467 9	173.684 4	-0.252 9	0.527
5	4.302 3	-98.236 1	-0.323 3	0.805 8
7	1.162 9	-109.70 9	-0.641 8	1.259 2
9	2.179 3	-22.090 3	-1.306 2	1.928 5
11	1.097 9	110.330 8	-1.065 9	2.156 1
13	0.568	132.176 3	-0.582 2	3.953
15	0.312 5	-179.465	-0.703 2	4.411 7
16	0.830 2	-180	-2.730 5	5
18	0.356 5	-166.096	-1.023 5	3.392 9
20	1.344 5	88.550 2	-1.872	2.881 9

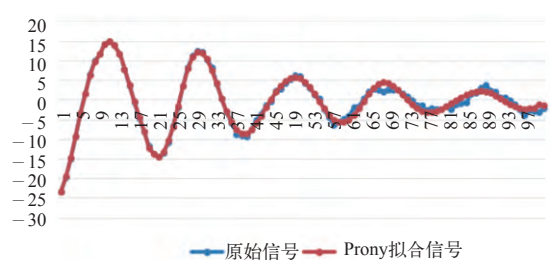


图5 Prony分析结果（衰减阶段）

地根据实时的数据对电网的低频振荡进行拟合跟踪，并且能够随时分析出低频振荡的各项数据，还原电网基本模型。

4.4 基于离散傅里叶变换预处理的
低频振荡主模式识别

通过理论研究和实际数据的分析不难发现，低频振荡中存在一个最能体现振荡特征的分量，称之为主要模型，也就是在Prony分析中，除去噪声干扰以外的幅值最大的几项，提出如下几点来衡量一个Prony分析模式分配的合理性：有效项应当集中分布，而且数量越少越好；主要模式应当能够大致反映除去噪声误差之后的原始信号；每个模式的幅值应当不能超过原始信号的范围。由此可见，确定一个低频振荡的主导模式分布，是

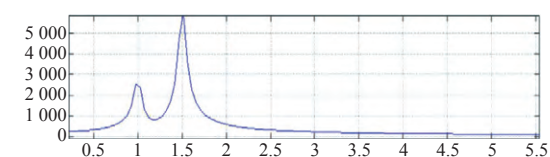
研究低频振荡的最主要任务，也是衡量Prony分析结果的有利证明。

离散傅里叶变换是将离散信号分解为连续的频谱的方法，用来分析低频振荡有无无法衡量振荡的相位、衰减等参数的缺点，考虑到Prony算法也是将信号分解成不同频率信号的线性组合，那么可以考虑到利用DFT对信号进行分析，由此确定低频振荡主要模式的频率分布。

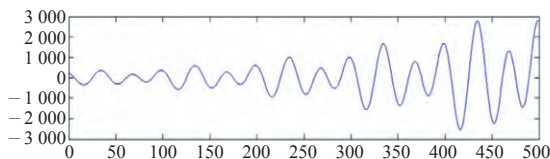
考虑一个振荡信号，即

$$y = 220e^{-0.25t} \cos(2\pi \times 1.5t + \pi) + 110e^{0.25t} \cos(2\pi t + \pi/2) \quad (21)$$

考虑到能量分布上信号要远大于噪声，因此分析算例未加入噪声分析，将这个信号进行离散傅里叶变换，得到连续的频谱图，如图6所示。



(a) 算例信号的离散傅里叶变换



(b) 算例信号的波形

图6 算例信号的离散傅里叶变换以及算例信号的波形

从图6可以看出，DFT变换的结果在1 Hz和1.5 Hz上有两个极值点，这和测试算例函数的频率是相对应的，接下来对这个信号进行采样并进行Prony分析，结果如表3所示。

表3 测试算例三的Prony分析结果

阶数	幅值	相位	衰减因子	衰减频率
4	0.000 1	-17.124 8	-0.142 7	3.886 6
6	0	57.144 9	1.382 8	2.386 8
8	110.000 4	90.000 5	0.25	1
10	219.999 3	-0.000 3	0.25	1.5

由表3可见，不管是DFT分析还是Prony分析，都很好地反映了原信号的主模式的分布，因此DFT可以在基于Prony算法分析的低频振荡中起到检测起振和确定主要模式的频域分布的作用，具有一

定的实用价值。

5 结束语

依据Prony算法，通过降噪设计、阶数估计和振荡检测等改进，设计了电网低频振荡在线监测系统，测试算例通过分析真实的在线数据，验证了系统的可行性，证明了Prony算法在在线电网分析计算领域的广阔前景。

Prony算法主要应用于系统传递函数的辨识，对控制器的设计与参数调节、控制信号的选取及系统模型验证等有着重要意义。除此之外，可以考虑引入模式识别方法应用于低频振荡的原因分析和系统的故障诊断，在实践中根据实际参数中的主导模式的频率、相位及幅值等反推电网的运行情况，从而辅助监控人员及时发现问题，保证电网稳定运行，这些工作值得在今后进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 潘学萍. 电力系统低频振荡 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 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.
- [3] 邵俊松, 李庚银. 电力系统低频振荡分析及振荡解列策略研究综述 [J]. 电力科学与工程, 2000 (2): 1-5.
- [4] 韩祯祥. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [5] 陈刚, 何潜, 段晓, 等. 电力系统低频振荡分析与抑制综述 [J]. 南方电网技术, 2010, 4 (3): 17-22.
- [6] 王志军. 基于广域量测系统的电力系统稳定器研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [7] 叶红权, 林涛, 黄涌, 等. 改进Prony算法在电力系统低频振荡波形分析中的应用研究 [J]. 华中电力, 2008, 21 (2): 1-4.
- [8] 胡春. 基于WAMS的电力系统低频振荡模态参数在线辨识 [D]. 保定: 华北电力大学, 2011.

(收稿日期: 2015-12-13) EA