

基于 Prony 算法的模糊电力系统稳定器设计

魏 伟, 赵书强, 马燕峰

(华北电力大学 电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 在简介 Prony 算法步骤的基础上, 阐述了电力系统低频振荡分析的 Prony 方法。提出了可将 Prony 算法应用于模糊电力系统稳定器 FPSS(Fuzzy Power System Stabilizer)修正因子、比例因子的调节、整定。采用 Prony 算法为一个单机无穷大系统设计的 FPSS 作仿真试验, 仿真结果显示了其可行性和有效性, 为 FPSS 的设计提供了一种新方法。

关键词: 低频振荡; Prony 算法; 模糊电力系统稳定器

中图分类号: TM 712

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2005)03-0054-03

0 引言

基于模糊控制的电力系统稳定器 FPSS(Fuzzy Power System Stabilizer)设计简便, 相比传统参数固定的由超前滞后环节组成的电力系统稳定器, 无需知道系统的数学模型且具有较强的鲁棒性, 能较好地改善系统动态稳定性。

Prony 算法是现代谱分析的一种, 它用指数函数的一个线性组合描述等间距采样数据, 经适当扩充形成能够估算给定信号的频率、衰减、幅值和初相位的算法。本文通过公式型模糊算法设计 FPSS 的优化控制规则, 利用 Prony 算法提取低频振荡特征以进行比例因子(文中比例因子包括模糊稳定器的比例因子 K_1 , K_2 和量化因子 K_3)的调整, 为 FPSS 的设计提供了新思路。

1 Prony 算法简介

1.1 Prony 算法的优点

传统的信号谱分析方法如傅里叶算法、短时傅里叶算法等, 基本只能分析稳定信号, 而对动态数据无能为力。小波分析是数学领域近年来的工作结晶, 具有广泛的应用前景, 适合于分析信号的奇异点, 但是分析振荡问题时还存在难于选择小波基和结果精度差等局限。

随着计算机技术的不断发展, Prony 方法得到越来越多的应用。相对于其他几种分析方法, Prony 方法有以下优点。

a. Prony 方法可直接求得信号的频率、衰减、幅值和相位, 而无需从频域响应来求, 计算量大为减少。

b. Prony 方法采用最小二乘意义上的拟合, 有利于消除测量过程中的噪声影响。

1.2 Prony 算法步骤

Prony 算法采用的数学模型为 1 组 p 个具有任

意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数, 其离散时间的函数形式为

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

将其用作样本数据 $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ 的模型。更一般的, b_i 和 z_i 假定都是复数, 且

$$b_i = A_i e^{j\theta_i}, \quad Z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t}$$

式中 A_i 为幅值; θ_i 为相位(单位为弧度); α_i 为衰减因子; f_i 为振荡频率; Δt 为采样间隔。

Prony 方法的推导过程详见文献[1], 以下简单介绍该方法的步骤。

a. 设 $r(i, j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j) x^*(n-j)$, 构造样本函数矩阵 R 为

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

b. 确定 R 的有效秩 p 。

c. 求解方程(3), 以得到参数 $a_1, a_2, \dots, a_p$ 的值。

$$[R] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

d. 求多项式(4)的根 z 。

$$1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_p z^{-p} = 0 \quad (4)$$

并根据式(5)计算出 $\hat{x}(n), n=1, 2, \dots, N-1$ 。

$$\hat{x}(n) = -\sum_{m=1}^p a_m \hat{x}(n-m) \quad (5)$$

e. 计算参数 b 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(1) \\ \hat{x}(2) \\ \vdots \\ \hat{x}(p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

f. 由式(7)计算振幅、相位、频率和衰减因子。

$$A_i = |b_i|$$
$$\theta_i = \arctan[\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i)]$$
$$\alpha_i = \ln |z_i| / \Delta t$$
$$f_i = \frac{\arctan[\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i)]}{2 \pi \Delta t}$$

(7)

通过以上 Prony 算法对输入信号进行分析,可准确得到输入信号的振幅、相位、频率和衰减等特征。

2 电力系统低频振荡分析的 Prony 方法

Prony 方法能够根据测量数据很快求得所需信息并能很好地拟合曲线,因此,能用于分析电力系统的低频振荡信号,以得到系统低频振荡的全部特征,指导 PSS 的参数设计。

仿真模型基于 Matlab 系统,为一台发电机经长线路到无穷大系统,参照文献[2]设置系统参数,模拟系统的低频振荡过程。系统运行时投入小的阶跃扰动,模拟系统受到小扰动,产生低频振荡的情况。见图 1,仿真得到的 $\Delta \omega$ 波形如图 1 中虚线所示;实线为拟合曲线; n 为采样点数。

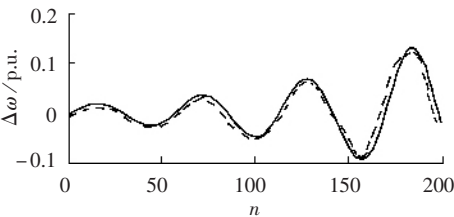


图 1 仿真 $\Delta \omega$ 与其 Prony 分析结果

Fig.1 The simulative $\Delta \omega$ and Prony analysis result

对仿真得到的 $\Delta \omega$ 波形进行 Prony 分析,采样点间距为 0.02 s,一共采样 200 个数据点,Prony 算法的分析结果如表 1 所示。分析结果中有衰减为 -17.208 且幅值接近于零的成分,大大小于主振荡分量,可认为是由于仿真系统产生噪声影响,应忽略不计,因此主要振荡特征频率为 0.885 9 的振荡分量。

表 1 仿真信号的 Prony 分析结果

Tab.1 The Prony analysis result of simulative signal

幅值 / p.u.	f / Hz	衰减因子	初相位 / rad
0.015 444	0.885 9	0.575 5	-1.568 60
$3.961 4 \times 10^{-5}$	6.240 6	-17.208 0	0.573 15

Prony 分析结果的拟合曲线如图 1 中实线所示,可看出拟合曲线和振荡曲线几乎完全重合。得到系统小扰动的振荡频率为 0.885 9 Hz,衰减因子为 0.575 5,是一种增幅振荡,说明系统本身不稳定。当系统受到扰动开始振荡后,振荡幅度会逐渐增大,系统最终将失去稳定,实际仿真结果也说明了这一点。

通过以上的仿真结果可见,将 Prony 算法应用于电力系统低频振荡分析,可以准确有效地得到低频振荡的全部振荡特征,说明 Prony 方法是分析电力系统低频振荡的有效方法。

3 FPSS 设计

3.1 模糊控制器结构

模糊控制器结构如图 2 所示。设计的模糊控制器为单变量二维模糊控制器,其输入信号为发电机转速偏差 $\Delta \omega$ 和转速偏差的变化 $\Delta \dot{\omega}$,代数模型为

$$u_{\text{FPSS}} = K_3 f(K_1 \Delta \omega + K_2 \Delta \dot{\omega})$$

(8)

式中 f 为非线性函数;比例因子 K_1, K_2 分别相当于模糊控制器的比例作用和微分作用的系数; K_3 则相当于总放大倍数。

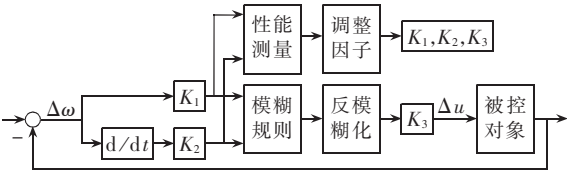


图 2 模糊控制器结构

Fig.2 The structure of fuzzy controller

3.2 修正因子调节

根据电力系统要求,对于一个常规的二维 FPSS,可选择 $\Delta \omega$ 和 $\Delta \dot{\omega}$ 作为其输入变量产生控制信号 ΔU 调节励磁,抑制系统低频振荡,可得公式型 FPSS 表达式为

$$\Delta U = \langle \alpha X + (1 - \alpha) Y \rangle$$

(9)

式中 X, Y 为输入量 $\Delta \omega, \Delta \dot{\omega}$ 的模糊值; α 为修正因子。

公式法直接由式(9)求得控制信号,其控制规则依赖于 α ,当 α 的值一确定,在整个控制过程中就不再改变。而模糊控制系统在不同的状态下,对控制规则中偏差 $\Delta \omega$ 和偏差变化 $\Delta \dot{\omega}$ 的加权程度有不同的要求,即:当偏差较大时,控制系统的主要任务是消除偏差,则要求偏差有较大的权重;当偏差较小时,为避免产生超调使系统迅速稳定,则要求偏差变化率有较大的权重。单凭经验手动调节 α 不但具有盲目性,而且很难获得最佳效果。因此,考虑采用一种在全论域范围内自调整修正因子的模糊控制器,其因子调整规则可表示为

$$\alpha = (\alpha_s - \alpha_0) |X| / m + \alpha_0$$

(10)

设 X 论域为 $\{-m, -m+1, \dots, m-1, m\}$,本文 m 取 3,其中 α_s, α_0 为修正因子 α 规定的变化范围,且 $0 \leq \alpha_0 \leq \alpha_s \leq 1$ 。由式(10)可知,此规则可使 α 与系统误差成线性插入关系,且在 (α_0, α_s) 范围内有 m 个取值,从而在整个误差论域内按误差大小自动调整因子 α 。这种 FPSS 的控制方式简单有效,符合系统控制过程且具有自寻优性质,也便于微机实现。

3.3 比例因子整定

在调整系统特性时,比例因子之间是相互制约的。在 FPSS 的设计过程中,先确定 K_1 与 K_2 ,然后由 Prony 算法提取系统低频振荡特征指导 K_3 的整定。由多次仿真实验结果,可制定整定规则如下:

a. 当系统振荡衰减因子为正值时,以较大的幅度增大 K_3 ;

b. 当系统振荡衰减因子为绝对值较小的负值时,根据适当的衰减因子范围增大 K_3 ;

c. 当系统振荡振幅很大,且衰减因子为绝对值很大的负值时,以较大的幅度减小 K_3 。

经过以上整定规则选定的比例因子,一般可满足系统稳定性和鲁棒性的要求。

4 仿真试验

本文采用 Prony 算法为一个单机无穷大系统设计了一个 FPSS,系统结构如图 3 所示。

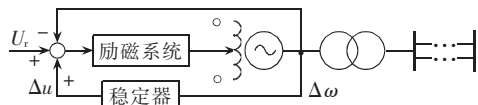


图 3 含 FPSS 的单机无穷大系统结构

Fig.3 The structure of single-machine infinite-bus system with FPSS

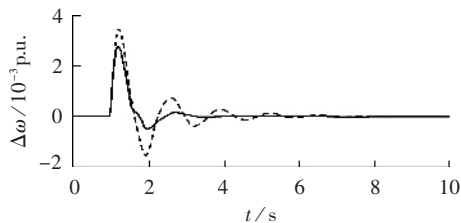
初始给定的 FPSS 参数为 $K_1=1200, K_2=30, K_3=0.03$, 经过 Prony 算法优化后参数为 $K_1=1200, K_2=30, K_3=0.07$ 。

为了全面评价控制器的控制性能,选定了以下 3 种典型的扰动,对采用 Prony 算法整定前后的 FPSS 进行了比较。

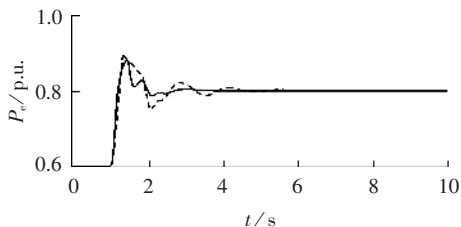
a. 正常运行条件下,发电机组的原动机功率在 1.0 s 由 0.6(p.u.)跃变到 0.8(p.u.),非线性仿真结果如图 4 所示(图中虚线为优化前曲线,实线为优化后曲线;图 5 同)。

b. 正常运行条件下,1.0 s 输电线高压侧发生三相接地短路,0.2 s 后故障切除,非线性仿真结果如图 5 所示。

由图 4 和图 5 的仿真结果可见,所设计的 FPSS 对系统性能有明显的改善,使用了 Prony 算法整定



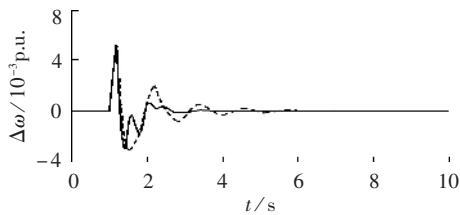
(a) $\Delta\omega$ 仿真结果



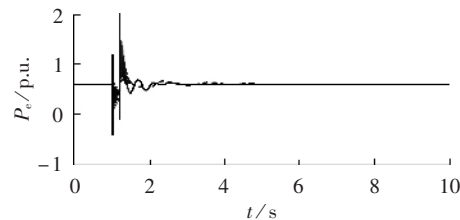
(b) P_e 仿真结果

图 4 正常运行条件下机械功率发生跃变的仿真曲线

Fig.4 The simulative curves with mechanical power step change in normal operation condition



(a) $\Delta\omega$ 仿真结果



(b) P_e 仿真结果

图 5 额定运行条件下三相接地短路的仿真曲线

Fig.5 The simulative curves with three-phase grounding fault in rated operation condition

比例因子后的控制器对运行状态的变化以及系统干扰或故障不敏感,能够在较大的运行范围内有效地增强系统阻尼,抑制振荡,提高系统的动态稳定性,显示了较好的适应能力。

5 结论

本文提出了一种利用 Prony 算法设计模糊电力系统稳定器的新方法,它将 Prony 算法应用于电力系统低频振荡信号特征的提取,以进行模糊电力系统稳定器比例因子的优化。仿真结果表明,用该方法设计的模糊电力系统稳定器能有效抑制系统的低频振荡,提高系统的动态稳定性,且具有很强的鲁棒性,显示了 Prony 算法在电力系统控制中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [2] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [3] 孙庚山,兰西柱. 工程模糊控制[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [4] 朱伟兴,马长华,毛罕平,等. 比例因子的选择对模糊控制器鲁棒性的影响[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001,22(2):76-78.
ZHU Wei-xing, MA Chang-hua, MAO Han-ping, et al. Effect of scaling factor choice on robust performance of fuzzy controller[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science), 2001,22(2): 76-78.
- [5] 王铁强,贺仁睦,王卫国,等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):21-25.
WANG Tie-qiang, HE Ren-mu, WANG Wei-guo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(2):21-25.
- [6] 黄成静,王琳,马平. 用 Matlab 实现模糊汽温控制系统的计算机仿真[J]. 电力情报,2002,(1):32-34.

HUANG Cheng-jing,WANG Lin,MA Ping. Implementation for computer simulation of fuzzy steam temperature control system with Matlab[J]. **Information on Electric Power**,2002,(1):32 – 34.

[7] LU J,NEHRIR M H,PIERRE D A. A fuzzy logic-based adaptive power system stabilizer for multi-machine systems [A]. **Power Engineering Society Summer Meeting [C]**. Seattle, Washington:IEEE,2000. 111 – 115.

[8] TRUDNOWSKI D J,JOHNSON J M,HAUER J F. Making Prony analysis more accurate using multiple signals

作者简介：
魏 伟(1979－)，男，河南焦作人，硕士研究生，研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail:wei791108@163.com)；
赵书强(1964－)，男，河北景县人，副教授，博士，研究方向为电力系统稳定分析和控制、电力系统谐波分析等；
马燕峰(1978－)，女，河北迁西人，硕士，研究方向为电力系统分析、运行与控制。

Design of fuzzy power system stabilizer based on Prony algorithm

WEI Wei,ZHAO Shu-qiang,MA Yan-feng

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The steps of Prony algorithm are briefly introduced,and its application in low frequency oscillation analysis of power system is detailed. The Prony algorithm is used to regulate and tune the correction factor and proportion factors of FPSS (Fuzzy Power System Stabilizer). A single-machine infinite-bus system with FPSS designed by Prony algorithm is tested,and the simulative results show its feasibility and effectiveness,which provides a new way for FPSS design.

Key words: low frequency oscillation; Prony algorithm; fuzzy power system stabilizer