

基于 Prony 方法的电力系统低频振荡分析

白 洋, 李国庆, 姚天亮

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 电力系统低频振荡时常发生, 准确提取振荡频率成为抑制其发生的前提。介绍了 Prony 方法的计算过程以及如何提高 Prony 分析方法的准确性, 通过与电力系统中已有算法的比较, 分析了 Prony 方法在电力系统中的适用性。成功的应用 Prony 方法检测到了 PSASP 中 8 机系统的主导低频振荡模式, 算例结果表明, 该方法实用、有效、准确性较高, 完全能满足实际应用的需要, 是一种有效的工具。

关键词: 低频振荡; Prony 分析; 主导低频振荡模式; 功角曲线

Abstract: The low frequency oscillations in power system often occur. The accurate extraction of oscillation frequency becomes the premise which suppresses it to occur. The computation process of Prony method and how to enhance the accuracy of Prony analysis method are introduced. Compared Prony method with other existing algorithms used in power system, the serviceability of Prony analysis method in power system is analyzed. And Prony method is successfully applied to detect the dominant modes of low frequency oscillations of the 8-machine system in PSASP. The example results indicate that the method is practical, effective and has a higher accuracy. It can satisfy the need of practical application completely, and it is an effective tool.

Key words: low frequency oscillation; Prony analysis; dominant mode of low frequency oscillation; power angle curve

中图分类号: TM761 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)-0040-02

随着电网的日益扩大, 大容量机组在电网中的不断投运, 快速励磁的普遍使用, 低频振荡现象在大型互联电网中时有发生。发电机在电网中并列运行时, 在扰动的情况下发生转子间的相对摇摆, 并在阻尼不足时发生持续性的振荡^[1,2]。此时在输电线上传输的功率也会发生相应振荡。由于机组的惯性时间常数其振荡频率很低, 引起的振荡的范围一般为 0.1~2.5 Hz 这就是低频振荡。低频振荡一般发生在长距离、大负荷输电线上, 由于普遍采用现代快速、高顶值倍数励磁系统, 现在低频振荡在电力系统中更易发生。低频振荡一般为局部振荡和区域间振荡。局部振荡是指在区域内某一台电机或几台电机相对于区域内其他机组振荡, 由于其电气距离较近, 所以频率一般较高, 在 0.7~2.5 Hz 之间。区域振荡是指在不同区域的电机群之间发生相互振荡, 其距离较大, 所以频率一般较低, 在 0.1~0.7 Hz 之间。认识和找到处理电力系统低频振荡的本质和方法, 在全国电力系统不断互联中显得更加重要。

近年来, 电网的低频振荡现象非常频繁, 已经严重影响电网的稳定运行。研究系统的低频振荡就要首先得到系统的振荡频率、幅值及衰减等信息, 常

用的傅里叶变换和小波变换等方法不易提取衰减特性, 而且精度不高^[3]。利用 Prony 分析法, 可以通过从系统中得到的信号直接获得信息, 特别是可以直接得到系统特征值, 使电力系统稳定分析更加便捷。

1 Prony 方法特点及其应用

早在两百多年前, Prony 就提出了使用 e 的指数函数的线性组合来拟合等间距采样的数学模型。Prony 方法可以有效地获取系统振荡模式特征, 它可通过给定输入信号下的响应直接估计系统的振荡频率、衰减、幅值和初相位^[4]。该方法是用含有 N 个指数项的指数曲线来拟合 $2N$ 个数据样本, 当数据样本个数大于 N 时, 该方法也是在最小二乘意义下实现的。

Prony 算法假设模型是由一系列的具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的组合, 也就是说, 由一组衰减的正弦分量所组成^[5]。

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

式 (1) 是数据 $x(0), \dots, x(N-1)$ 的模型。

$$h_m = A_m \exp(j\theta_m) \quad (2)$$

$$z_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t] \quad (3)$$

其中, A_m 为幅值; θ_m 为相位; α_m 为衰减因子; f_m 为振荡频率; Δt 为采样间隔。

为使模拟信号逼近于真实信号, Prony 算法使平方误差最小, 即

$$\min(\epsilon) = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (4)$$

Prony 方法之所以被广泛地应用于求解低频振荡的模式, 是因为方法本身的特点^[6]。

(1) 可以对信号进行快速拟合, 从而得到各个分量的振幅、阻尼比、频率、相角等信息。

(2) 不需要对大系统进行大规模的矩阵分析, 可通过输入特定信号和输出信号快速得到系统的传递函数。

(3) 可根据现场测量的信号得到系统的参数和传递函数, 从而解决了设计中参数数据与实际数据不符造成的控制器参数误差。

(4) Prony 方法处理高阶系统效果好, 系统模型阶数的选择可以根据辨识的目的和需要具体确定^[7]。

2 Prony 方法应用的范围

在应用 Prony 分析功能时, 需要注意 Prony 方法的适用范围。由于 Prony 方法基于线性系统原理, 所以 Prony 分析法适合于分析系统非线性特性已不明显, 或线性系统特性已恢复的工况。具体点讲, 应用 Prony 方法分析曲线所含模式时, 应注意:

(1) 取点数在 100 至 500 个点为宜。

(2) 曲线的起始时间应选择在故障结束以后, 因为受故障影响, 故障期间曲线的变化较大, 非线性较强, 这部分曲线不能反映系统自身的模式, 还会影响 Prony 分析的准确性。

(3) 取点间隔据实际情况而定, 对于大系统, 主要研究频率在 0.1 至 2.5 Hz 之间的振荡模式, 因此采用 0.2 s 的取点间隔比较合适, 但对于某些振荡频率较快的曲线, 如果只采用 0.2 s 的间隔, 则曲线会很光滑。

3 算例分析

3.1 8 机系统算例

以电力系统分析软件包 (PSASP) 中的 8 机系统为算例。发电机采用 3 阶模型 (δ, ω, E_q')。其中 1 号、7 号和 8 号机没有励磁控制, 其余 5 台机采用如 PSASP 所示的二型快速励磁, 系统总阶数为 28 阶。2 号机励磁系统放大系数 $k_{e2} = 24$, 其他机的放大系数均为 16, 2 号机励磁系统时间常数 T_{e2} 为 0.005 s, T_{a2} 为 0.06 s, 其他机时间常数 T_i 均取 0.005 s, T_a 均取为 0.015 s。

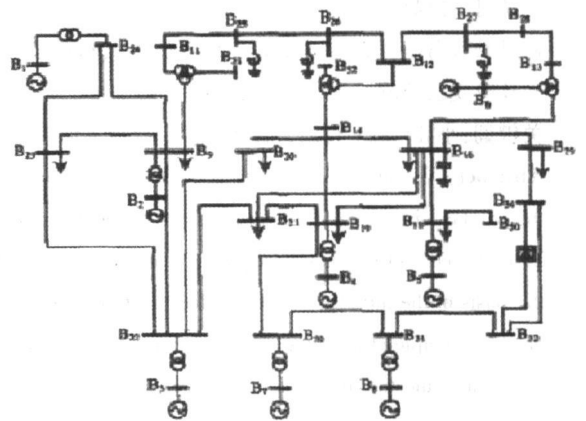


图 1 8 机系统

假定 $t=1$ s 时, 在 6 号发电机出口变压器高压侧发生三相瞬时短路, 得到功角曲线 δ_{36} 。

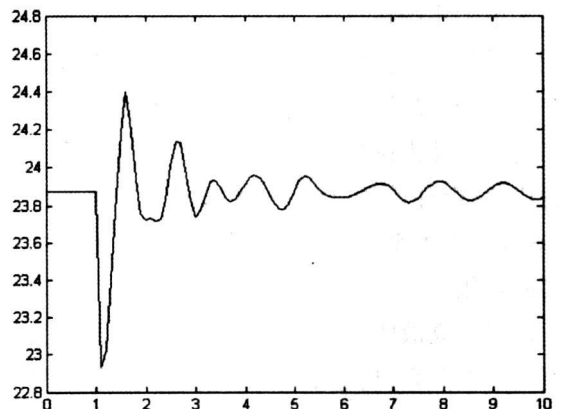


图 2 功角曲线 δ_{36}

对功角曲线 δ_{36} 分析^[8], 可以知道频率为 0.78 Hz 的低频振荡模式为该曲线的主导模式, 这与对 8 机系统进行 QR 分析得到的主导低频振荡模式相同。说明了 Prony 方法分析低频振荡的有效性。

表 1 功角曲线 δ_{36} 的主导模式

模式	幅值	阻尼	振荡频率 (Hz)	能量级
1	9.0e+000	-2.4e+000	7.8e-001	5.4e+001
2	1.6e+000	-8.2e-001	1.1e+000	4.1e+001

3.2 四川电网算例

(下转第 73 页)

参考文献

[1] 段登伟,刘俊勇,吴集光. 计及风险的配电公司最优分时零售电价模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, (3): 8-12.

[2] 段登伟,刘俊勇,刘继春,等. 基于激励原理的可中断负荷. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(3): 143-148.

[3] 黄海峰,田华,吴巍. 2006 年湖北电网迎峰度夏电力需求侧管理 [J]. 湖北电力, 2005, 30(1): 91-94.

[4] 田诺,仇新宇. 供需平衡时期电力供应应急预案编制的探索 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(1): 16-19.

[5] 中国赴欧洲电力需求侧管理培训团. 欧洲电力需求侧

管理对中国的启示(上)——来自中国赴欧洲电力需求侧管理的培训报告 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(2): 13-18.

[6] 王明俊. 市场环境下的负荷管理和需求侧管理 [J]. 电网技术, 2005, 29(5): 1-5.

作者简介:

刘凌川 (1974—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力运行管理工作;

段登伟 (1974—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电网调度管理工作, 研究方向为电力市场、需求侧管理;

邓 华 (1973—), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护工作。

(收稿日期: 2008-10-29)

(上接第 41 页)

由文献 [9] 可知, 四川本地的低频振荡模式有 6 个, 将 2 个区域间模式列于表 2。

按 3.1 中方法, 在川云潭 31 号发电机出口变压器高压侧施加扰动, 在它与远处的托托电 G3 机组功角曲线上可以检测到频率为 0.21 Hz 的振荡模式, 而且该模式占主导作用。

表 2 四川电网区域间主导模式

序号	模式	频率 (Hz)	衰减阻尼比 (%)
1	$-0.0389 \pm j1.333$	0.21	2.9
2	$-0.0706 \pm j2.576$	0.41	2.7

同样, 在川二滩 04 号发电机出口变压器高压侧施加扰动, 在它与远处的鲁荷泽厂 5 号机组功角曲线上, 可以检测到频率为 0.41 Hz 的振荡模式, 而且该模式占主导作用。

4 结 论

介绍了 Prony 方法的理论基础和 Prony 算法主要特点及其适用范围, 通过试验信号证明了 Prony 方法适于分析振荡信号。最后通过仿真验证, 证明 Prony 算法完全可以分析低频振荡数据特征, 是一种有效的分析工具。

参考文献

[1] 吴敬儒,徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.

[2] 王海林,黎岚,吴安平,高万良,四川“十一五”电网规划及远景展望 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 5-7.

[3] 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.

[4] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,王昕伟. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究 [J]. 中国电力, 2001, 43(11): 38-41.

[5] 芦晶晶,郭剑,田芳,吴中习. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.

[6] 刘剑,刘天琪. Prony 在电力系统稳定控制领域中的应用 [J]. 现代电力, 2005, 22(6): 27-31.

[7] 曹维,翁斌伟,陈陈. 电力系统暂态变量的 Prony 分析 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 56-60.

[8] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.

[9] 邓集祥,贺建明,姚天亮. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78-83.

作者简介:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

李国庆 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

姚天亮 (1979—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2008-12-10)