

文章编号: 0258-8013 (2002) 02-0021-05

# 电力系统低频振荡机理的研究

王铁强<sup>1</sup>, 贺仁睦<sup>1</sup>, 王卫国<sup>1</sup>, 徐东杰<sup>1</sup>, 魏立民<sup>2</sup>, 肖利民<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电力系, 北京 100085; 2. 河北电力调度通信中心, 石家庄 050021)

## THE MECHANISM STUDY OF LOW FREQUENCY OSCILLATION IN POWER SYSTEM

WANG Tie-qiang<sup>1</sup>, HE Ren-mu<sup>1</sup>, WANG Wei-guo<sup>1</sup>, XU Dong-jie<sup>1</sup>, WEI Li-min<sup>2</sup>, XIAO Li-min<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 100085, China;

2. Hebei Electric Power D&C Center, Shijiazhuang 050021, China)

**ABSTRACT:** A field data case of Hebei south net An-bao line oscillation is analyzed by the Prony algorithm first in the paper. The mechanism of power system low frequency oscillation is then discussed. The paper presents that the Resonance mechanism of disturbing frequency and nature oscillation frequency may be a reason for power oscillations. Farther simulations analyze the possible disturbance to system, and a conclusion has been made that the An-Bao line oscillations quite fit the resonance case. At last the possible disturbances to power system is discussed, and some suggestions are made for further study.

**KEY WORDS:** low frequency oscillation; negative damping; prony algorithm; resonance mechanism

**摘要:** 应用 Prony 算法研究了河北南网安保线低频振荡的具体实例, 并讨论了低频振荡的机理, 提出低频振荡的机理之一是由于扰动的频率与自然振荡频率共振造成的。通过仿真分析了共振型低频振荡的算例, 认为安保线振荡与共振机理相当符合。最后分析了各种扰动施加对系统的影响, 为今后的分析提出了建议。

**关键词:** 低频振荡; 负阻尼; PRONY 算法; 共振机理

中图分类号: TM37 文献标识码: A

## 1 引言

电力系统运行机组间有时会出现功率振荡的问题, 振荡频率的范围在 0.2~3 Hz, 因此称为低频振荡。在振荡过程中, 参与振荡的机组转子会进行相对摆动, 输电线路功率来回传输, 影响了系统的正常运行, 严重时系统将失去同步。

一般认为低频振荡的机理是由于在特定情况下

系统提供的负阻尼作用抵消了系统电机、励磁绕组和机械等方面的正阻尼, 使系统总阻尼很小或为负。系统在负阻尼工况下受到扰动时, 扰动逐渐被放大, 进而引起功率的低频振荡。重负荷线路、现代快速励磁和高顶值倍数的励磁系统是造成系统出现负阻尼的主要原因。

电力系统稳定器(PSS)引起的相位超前能够补偿由于励磁系统和电机励磁绕组引起的滞后, 因此可较大地提高系统的阻尼水平, 起到抑制低频振荡的作用。但在实际系统中, 也出现过即使装设了 PSS 又发生低频振荡的例子, 分析表明这种低频振荡具有一些与系统的负阻尼振荡不同的特点。

本文首先采用 Prony 分析方法对现场实测数据进行分析, 提取振荡特征。进而提出低频振荡的共振机理。仿真结果表明其共振机理与现场实测吻合。为机理不明的低频振荡分析和控制提供了新思路。

## 2 应用 Prony 算法分析安保线低频振荡

### 2.1 Prony 算法简介

传统的信号谱分析方法如傅氏算法、短时傅氏算法等, 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取小波基和结果精度差等局限。

1795 年, Prony 提出了用指数函数的一个线性组合来描述等间距采样数据的数学模型, 经过适当扩充, 形成了能够估算给定信号的频率、衰减、幅值和初相角的 Prony 算法<sup>[1]</sup>。正是由于这一特点, 该

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50177008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50177008).

算法在电力系统响应信号分析特别是低频振荡分析中显示出良好的应用前景<sup>[2~4]</sup>。

Prony 方法把时域信号分解成衰减的正弦信号组合形式

$$y(t) = \sum_{i=1}^q A_i \exp(\sigma_i t) \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

其主要步骤如下:

- (1) 构造离散线性预测模型
- $$y(n) = a_1 y(n-1) + \dots + a_n y(0) \quad (2)$$
- (2) 寻找线性预测模型的特征根
- $$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (3)$$

(3) 利用步骤 2 得到的特征根决定每一种模式对应的幅值和初相角。

2.2 安保线振荡数据分析

500kV 安保线是上安电厂 32、33 号 300 MW 汽轮发电机组向河北南网送电的输电线路,从上安电厂到保北变电站(502)全长 192km,保北站 35kV 侧为无功补偿用绕组,220kV 母线通过 2 条线与河北南网 220kV 系统相连。系统等值网络如图 1 所示,等值系统参数为  $X_d = 1.3$ ;  $X_T = 0.3784$ ;  $X_1 = 0.215$ ;  $X_2 = 0.321$ ;  $X_3 = 0.3875$ ;  $T_j = 2.577$ 。

本文中,没有标明单位的变量采用的均为标值、比例系数或为了计算分析方便而处理过的量。

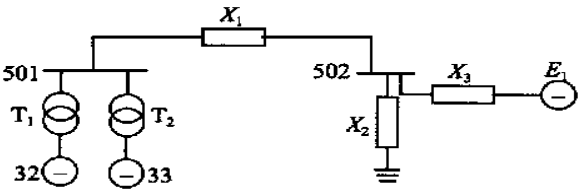


图 1 河北南网安保线等值系统图

Fig.1 Equivalent system of Hebei net An-bao line

从 1997 年 12 月起,河北南部电网上安电厂 3、4 号(在分析中为 32、33 号)机到保北变电站 502 的 500kV 线路发生了 10 多起大幅度的功率低频振荡。根据现场录波,总结振荡的数据资料,可以得出以下主要特点:

- (1) 振幅大,安保线功率振荡的振幅接近起振前的送电功率,最大值接近发电机的输出最大功率。
- (2) 振荡激发原因不确定,大扰动、小扰动甚至极微小的扰动都可激发振荡,但并不是所有大扰动都会激发振荡。
- (3) 振荡起振时增幅速度快。一般只需经过 2~3 个振荡周期就可达到最大。
- (4) 安保线功率振荡能自动平息,且平息速度快。

(5) 振荡中上安电厂机组与系统保持同步,虽然振幅增速很快,但最终发展为等幅同步振荡。

在装设了 PSS 后,安保线又发生了一次低频振荡。所有这些都说明这几次低频振荡的特点与负阻尼振荡有区别。

对录波数据进行 Prony 分析,有功波形如图 2 所示。将其按照 0~400 点,400~650 点,650~850 点 3 段划分,2 点的时间间隔为 0.02 s。数据的 Prony 分析结果如表 1 所示。(为计算方便,对其幅值进行了处理)

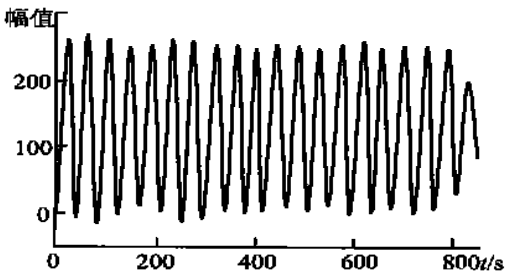


图 2 振荡功率波形  
Fig.2 Active power curve

表 1 有功数据的 Prony 分析结果  
Tab.1 Prony analysis results of active power data

数据段	幅值	频率/Hz	衰减	初相/rad
1	127.578 7	0	0.005 0	-0.000 0
	6.473 7	0.889 1	-0.026 6	1.853 6
	6.473 7	-0.889 1	-0.026 6	4.429 6
	65.127 2	1.179 4	-0.000 2	3.631 9
	65.127 2	-1.179 4	-0.000 2	2.651 3
	11.398 6	1.472 4	-0.099 5	1.496 0
2	11.398 6	-1.472 4	-0.099 5	-1.496 0
	131.845 3	0	-0.005 9	-0.000 0
	61.154 8	1.138 7	0.012 0	0.820 8
	61.154 8	-1.138 7	0.012 0	-0.820 8
	5.135 7	2.288 9	0.022 4	0.068 9
3	5.135 7	-2.288 9	0.022 4	-0.068 9
	4.390 0	2.297 9	0.084 2	4.409 0
	4.390 0	-2.297 9	0.084 2	1.874 2
	61.669 4	1.167 9	-0.053 5	-0.406 5
	61.669 4	-1.167 9	-0.053 5	0.406 5
	127.408 8	0	0.009 9	-0.000 0

由于振荡记录结束较早,没得到有功衰减的全部数据,因此 Prony 分析在第 3 段后半部时误差较大,经过反复试算,基本可以确定信号的衰减在 -0.5~-0.9 之间。

- 通过分析表 1 数据可以得到以下几点结论:
- (1) 在功率波形中周期分量的主导频率为 1.17 Hz 左右。同时随时间的不同,主频率分量不是一直不变的,但其变化不大。值得注意的是:经过小扰动分析算法对河北南网 47 台机的分析表明,上安电厂

32、33号机参与的振荡模式之一为1.16 Hz，与经过Prony分析的实测数据结果非常接近，因此可以认为本次振荡符合1.16 Hz振荡模式，从而可以确定这个振荡频率就是上安电厂32、33号机组相关的机电模式。同时据调查，保北站其他线路振荡幅度小，参与振荡机组多，因此可以简化为上安电厂与系统之间的单机无穷大形式的振荡，这就为进一步分析单机无穷大系统振荡机理提供了依据。

(2) 振荡幅值较大，振荡分量与直流分量(频率为0)基本相等(表2中的振荡分量按照方程的根成对地出现)。

(3) 主导频率分量的3段时间过程分别为基本零衰减(-0.0002)、小的增幅(0.012)和小的衰减(-0.0535)过程，总体体现出零阻尼和弱阻尼现象。

(4) 包含部分其它低频分量，特别是接近振荡的初始阶段，其它频率的幅值较大。

以上特点与负阻尼形式的振荡十分不同，说明快速励磁系统产生的负阻尼等因素不太可能是这类振荡的起因。因此安保线功率的低频振荡可能存在着其它的机理<sup>[5]</sup>。

### 3 电力系统共振型低频振荡机理

针对安保线振荡机理的特点可建立单机无穷大系统如下：

发电机采用二阶模型，转子运动方程为

$$\begin{cases} M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \end{cases} \quad (4)$$

在工作点处线性化，并忽略 $P_m$ 的变化，得

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{EU}{X_\Sigma} \cos\delta_0 - D\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \end{cases} \quad (5)$$

令 $K = \frac{EU}{X_\Sigma} \cos\delta_0$ ，其特征根为

$$P_{1,2} = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4MK}}{2M} \equiv \alpha \pm j\Omega \quad (6)$$

$D < 4MK$

如果系统阻尼为负，则 $D < 0$ ， $\alpha > 0$ ，此时显然为增幅振荡；若系统阻尼为零，则是等幅振荡。这就是单机无穷大系统负阻尼形式振荡的基本形式。但是当 $\Delta P_m \neq 0$ 时，可以得到

$$M\Delta\ddot{\delta} + D\Delta\dot{\delta} + K\Delta\delta = \Delta P_m \quad (7)$$

式(7)为非齐次常系数二次方程，其解为特解与齐次解之和。

假设输入的扰动量 $\Delta P_m$ 形式为

$$e^{\lambda t} (r_1 \cos \omega t + r_2 \sin \omega t)$$

则式(7)的特解可以表示为

$$y = e^{\lambda t} (k_1 \cos \omega t + k_2 \sin \omega t) \quad (8)$$

代入式(7)计算得

$$\begin{cases} k_1 = \frac{r_1 A - r_2 B}{A^2 + B^2} \\ k_2 = \frac{r_1 B + r_2 A}{A^2 + B^2} \end{cases} \quad (9)$$

设 $A = M(\lambda^2 - \omega^2) + D\lambda + K$

$$B = 2M\lambda\omega + D\omega$$

若考虑输入扰动为等幅振荡，即 $\lambda = 0$ ，则

$$\begin{cases} A = K - M\omega^2 \\ B = D\omega \end{cases} \quad (10)$$

可以认为扰动量的一项为0， $r_2 = 0$ (或 $r_1 = 0$ )，则特解为

$$y = \frac{r_1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

其幅值可以表示为

$$A_m = \frac{r_1}{\sqrt{(K - M\omega^2)^2 + D^2\omega^2}} \quad (12)$$

当 $\omega$ 变化时，幅值也随之变化，可以求得当 $A = 0$ 时，具有最大的幅值，这时系统的自然振荡频率

$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}}$ ，其最大幅值为

$$A_m = \frac{r_1}{|D| \sqrt{\frac{K}{M}}} \quad (13)$$

根据式(13)，设 $M = 5s$ ，阻尼比 $\xi = 0.15$ ，综合阻抗 $X_\Sigma = 1$ (标么值)，共振频率为1.24 Hz，可计算出如图3的共振曲线，图3表明对共振频率附近的小扰动具有较高的放大倍数<sup>[6~8]</sup>。



图3 共振曲线

Fig.3 Resonance curve

由此可看出系统若存在着一种扰动,当这种扰动的频率与系统的自然谐振频率一致或接近时,可能会引起共振的低频振荡现象。

通过共振曲线,可以找出共振频率、系统阻抗和转子惯性时间之间的关系,如图 4、5 所示。按照上例的参数,当系统阻抗由 0.1~10 变化时,可得到图 4 所示曲线,即振幅随阻抗的增大而增大,共振频率随阻抗的增加而减小;当机组的惯性时间在 4~12 s 变化时,其曲线如图 5 所示,振幅随惯性时间的增大而减小,共振频率也随之减小。

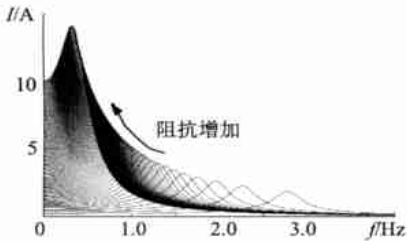


图 4 系统阻抗变化的共振曲线族  
Fig.4 Resonance curve family with reaction changing

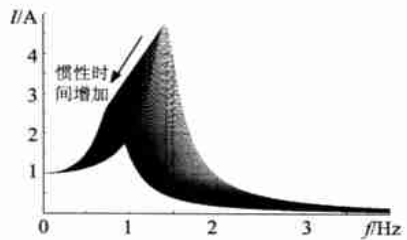


图 5 机组惯性时间变化的共振曲线族  
Fig.5 Resonance curve family with inertia time changing

#### 4 仿真分析

下面按照安保线模型进行共振扰动仿真分析,以验证安保线振荡是否是一种符合共振机理的振荡。

仿真模型基于 Matlab 系统,其一次系统如图 1 所示,参数按照河北南网给出的实际运行参数,其中 220 kV 系统采用等值系统。汽轮机、调速器系统采用自定义典型系统;发电机组、励磁系统采用 Matlab 定义,参数按照上安电厂机组参数设定。为了提高系统的阻尼水平,增大了  $q$  轴次暂态开路时间常数  $T_{q0}''$  的数值,以区别于负阻尼形式的振荡,同时采用 0.2 倍额定的轻负荷工况,以增大自然阻尼。为了仿真共振机理的振荡,首先要得到系统的自然振荡频率。因此首先在系统加三相短路切除并重合成功的扰动,观察发电机转速,得到系统的自由振荡频率为 1.165 Hz,结果和理论计算非常接近。

仿真时在原动机输出端加入扰动,表示在某种扰动下,使转子的机械功率与电磁功率不相等,转矩出现了不平衡,转子加速或减速运行,然后扰动消失,但扰动引发了持续的衰减很小的转子振动情况。

一般转子的振动频率要比低频振荡的频率高,但是当 2 种振荡的频率较接近时,可能引起拍振,如轴系的弯振和扭振形成的拍振等。拍振的频率则可能接近于系统的自然振荡频率。仿真模型暂不能模拟转子的机械振动,只能在汽轮机输出位置叠加小值振动。扰动时间为 7~17 s,首先是 1 s 的持续扰动,然后引发轴系按  $0.04\sin(1.165\times 2\pi t+0)$  小值拍振。图 6 给出了汽轮机输出的有功波形图。

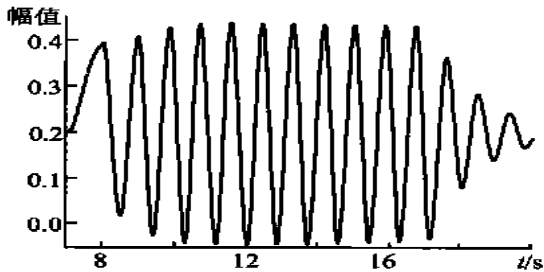


图 6 有功功率波形  
Fig.6 Simulation curve of active power  
对有功波形数据采用 Prony 分析算法提取振荡特征,得到表 2 的结果,(为分析方便,幅值进行了放大)。

表 2 仿真有功数据 Prony 分析结果  
Tab.2 Prony analysis results of simulation active power

数据段	幅值	频率/Hz	衰减	初相/rad
1	211.208 1	0	-0.032 7	0.000 0
	102.557 9	1.118 3	0.044 9	-0.369 6
	102.557 9	-1.118 3	0.044 9	0.369 6
	14.309 5	1.393 4	-0.352 2	2.235 0
	14.309 5	-1.393 4	-0.352 2	4.048 2
2	199.210 4	0	0.000 5	-0.000 0
	120.110 6	1.163 6	-0.000 0	3.386 3
	120.110 6	-1.163 6	-0.000 0	2.896 9
	8.319 4	1.079 0	-2.498 4	-1.198 2
	8.319 4	-1.079 0	-2.498 4	1.198 2
5	199.923 4	0	-0.000 5	0.000 0
	104.201 1	1.118 8	-0.738 9	4.009 1
	104.201 1	-1.118 8	-0.738 9	2.274 1

数据 3、4 段与第 2 段基本保持不变,因此略去,从表 2 可以看出,模拟轴系振动时,输出振荡波形有如下特点:

(1) 存在振荡主导频率为 1.16 Hz 左右,在开始和结束的部分有些变化,但变化不大。

(2) 振荡幅度大,振荡分量超过直流分量。最大有功接近额定值的 0.5 倍,而振荡前只有 0.2 倍,进一步分析表明:振幅的大小与系统正常时的工况关系不大,而与扰动的幅值有很大关系。此结论可

从式(13)进行解释：因  $K = \frac{EU}{X_{\Sigma}} \cos \delta_0$ ，当系统运行在正常工况时，功角  $\delta_0$  不大， $\cos \delta_0$  接近于 1，因此负荷变化引起的功角变化反映在  $K$  值的变化也不大，所以共振的幅值变化与负荷关系不大。这种情况与安保线振荡类似。

(3) 起振快，振荡在第 3 个振荡周期就接近最大幅度，这样的增幅速度与安保线振荡相同，是负阻尼方式振荡所没有的。

(4) 起振后保持同步振荡，且整个振荡的中间过程基本为零衰减，保持一种等幅振荡的情况，这也与安保线振荡相同。

(5) 一旦失去扰动源，振荡即很快地衰减，衰减因数为 -0.738 9。这说明系统此时具有很好的阻尼，其振荡不是负阻尼情况，而是由于共振的效应产生的振荡。这也与安保线振荡情况一致。

仿真中，除了在汽轮机输出端加扰动外，又进一步仿真了在调速器输入端和励磁系统输入端施加扰动，在系统侧投切负荷等几种情况。仍然按照上面的方式进行仿真，综合仿真结果得出：

(1) 调速器输入的扰动和励磁调节系统输入的扰动都可以在系统中产生大幅度共振形式的振荡。

(2) 调速器扰动和励磁调节系统扰动消失时，机端功率的衰减较慢，衰减因子只有 -0.2 ~ -0.3 左右，而轴系的扰动结束时衰减相对较快，与安保线情况比较接近。

(3) 3 种相同振幅的扰动在机端产生的振荡幅值不同，轴系、调速器输入与励磁调节器输入扰动产生的振荡幅值比为 1:0.8:2，说明控制系统对一次系统的作用还是很明显的，因此控制系统本身的问题同样也有可能是造成系统振荡的起因。

通过以上计算和仿真分析，说明安保线的振荡具有和共振形式的振荡类似的现象，因此安保线振荡的机理应该符合共振形式的振荡。转子上的扰动可能是转子的扭振与弯振形成的拍振，同时控制系统的扰动也可能是扰动的原因，确切的扰动原因则需要有现场的实测数据验证。

在系统侧单纯地投切负荷，虽然可以引起系统的功率波动，但是很难形成振荡，共振机理分析及仿真也说明了这一点。

## 5 结论

本文采用 Prony 算法分析了河北南网安保线振

荡的数据，精确地提取到振荡特征，结果说明安保线振荡与负阻尼形式的低频振荡存在很大的不同；进而研究了低频振荡产生的机理，提出低频振荡的机理之一是由于扰动的频率与系统自然振荡频率共振造成的；通过仿真分析了施加各种扰动对系统的影响，并采用 Prony 分析提取仿真振荡的特征进行定量比较，比较结果证实安保线振荡较符合共振形式的低频振荡。调速系统、励磁调节系统扰动或机组的轴系机械拍振都有可能是振荡的起因。同时单纯的负荷投切扰动产生振荡的可能性很小。

上述分析最终的证明则有赖于实测数据的观测，因此希望能在机组的轴系、调速系统及励磁调节系统加装同步测量记录装置，以得到系统的实际参数和扰动记录，对低频振荡问题进行更全面的分析。

## 参考文献：

- [1] 张贤达(Zhang Xianda). 现代信号处理(Modern signal process)[M]. 北京：清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1995.
- [2] Hauer J F. Initial results In prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [3] Trudnowski D J. Making prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 226-231.
- [4] Dmitry N, Kosterev, Carson W, Taylor, William A, Mittelstadt. Model validation for the august 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [5] 电力科学研究院(EPRI of China). 安保线功率振荡问题研究(The research of power oscillation on AN-bao line)[R]. 科研项目(Scientific Research Item)X9911, 1999.
- [6] 关根泰次(Y. Sekine). 电力系统暂态解析论(Electric power system transient analytics)[M]. 北京：机械工业出版社(Beijing: Industrial of mechanism Press), 1989.
- [7] 高景德, 张麟征(Gao Jingde, Zhang Linzheng). 电机过渡过程的基本理论及分析方法(The basic theory and analysis method of electric machine transition process)[M]. 北京：科学出版社(Beijing: Science Press), 1983.
- [8] 袁季修(Yuan Jixiu). 电力系统安全稳定控制(Security and stability control of electric power system)[M]. 北京：中国电力出版社(Beijing: Electric Power Press of China), 1996.

收稿日期：2001-02-19； 改回日期：2002-01-08。

作者简介：

王铁强(1970-)，男，博士研究生，从事电力系统分析与控制方面的研究；

贺仁睦(1944-)，女，博士，教授，博士生导师，从事电力系统动态监测、负荷建模、电压稳定和实时仿真等方面的研究。

(责任编辑 喻银凤)