

# 加速功率型电力系统稳定器整定方法研究

李啸聪, 陈葆超, 徐俊华, 王占颖

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为了给加速功率型电力系统稳定器(PSS2A)现场试验提供参考整定值, 减少反复试验对发电机及电力系统的影响, 使励磁控制器在低频振荡下具有较好的鲁棒性, 提出一种基于加速功率信号拟合的在线整定的方法。运用 TLS-ESPRIT 算法对 PSS2A 加速功率信号进行拟合得到系统的相频特性, 根据留数法算出 PSS2A 超前环节需要补偿角度的整定参数。利用该方法对南方电网某水电厂机组实测数据进行建模仿真, 与现场采用频谱仪测量计算得到的整定值进行仿真比较分析。数值仿真及实例分析表明该方法得到的整定参数具有较好的参考价值, 可给现场调试带来方便。

**关键词:** 电力系统稳定器; 在线整定; TLS-ESPRIT 算法; 留数法; 相频特性

## Research on parameter setting method for improved rotational speed power system stabilizer

LI Xiacong, CHEN Baochao, XU Junhua, WANG Zhanying

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** An online setting method based on fitting with rotational power signal is proposed to provide a reference setting value of improved rotational speed power system stabilizer (PSS2A) in field tests, which reduces the repeated tests' impact on the generator and the power system, enables the excitation controller has robustness in the situation of low-frequency oscillation. The TLS-ESPRIT algorithm is used in the method to fit the accelerating power signal of PSS2A and get the phase frequency characteristics of the system. The residue method is required to calculate the angle to be compensated of lead link in PSS2A. The measured data of a hydropower plant in CSG is simulated by using this method, and the simulation result is compared with the setting value calculated by spectrum analyzer in the field. Numerical simulation and test analysis prove that the setting value obtained by this method has a better reference value, which brings a convenience to the field debugging.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267001).

**Key words:** PSS; online setting; TLS-ESPRIT algorithm; residue method; phase-frequency characteristics

中图分类号: TM312; TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)17-0063-06

## 0 引言

随着我国电网互联范围的不断扩大, 实现了水火电互补、错峰和紧急功率支援, 同时也提高了电力系统的发电和输电的经济性<sup>[1]</sup>。但是由于电网互联程度的不断提高, 多次出现了大型互联系统产生低频振荡现象, 而且有些振荡无法平息或者无法在要求的时间范围内平息<sup>[2]</sup>。为了解决这个问题, 提出在励磁调节器中加装电力系统稳定器(PSS)来为

电力系统提供正阻尼<sup>[3]</sup>。

PSS 是抑制电力系统低频振荡最为有效的措施之一, 其输入信号有以下几种接法: 发电机轴转速; 发电机端或电厂母线电压频率; 发电机的输出电功率; 加速功率(过剩功率)。不同的输入信号对 PSS 的性能有着很大的影响。当输入信号采用发电机端或电厂母线电压频率时, 若系统运行方式发生变化时使得系统等效阻抗减少、系统阻尼下降, 系统稳定性下降; 当系统等效阻抗增加、系统阻尼增强时, PSS 增益增加, 但是励磁系统工作稳定性下降<sup>[4]</sup>。目前最理想的输入信号为基于转速和电功率的加速功率信号, 这种新型的 PSS 具有容易调整的

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51267001); 广西科学研究与技术开发计划项目(14122006-29); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338)

优点, 当系统输入机械功率调整时, 不会出现以电功率为输入信号那样的“反调”现象<sup>[5]</sup>。

实践证明, PSS 是抑制振荡最简单有效的方法, 为使励磁控制器能在低频振荡下具有较好的鲁棒性, 正确配置 PSS 参数尤为重要<sup>[6]</sup>。针对已有的 PSS2A 现场试验, 文献[7]退出 PSS2A 后通过频谱仪测量机端电压与 PSS2A 送加点之间的频率响应特性来得到励磁系统的滞后特性, 然后再根据逐步逼近法确定 PSS2A 的参数。上述方法给定的机组 PSS2A 参数有时并不能对发电机励磁系统相位滞后进行有效补偿<sup>[8]</sup>。本文提出采用 TLS-ESPRIT 算法<sup>[9-12]</sup>拟合加速功率信号求取系统阻尼特性, 相对于采用 Prony 算法拟合精度和抑制噪声能力有所提高。运用留数法<sup>[13-15]</sup>可以求得鲁棒性能较好的补偿环节参数, 为现场调试提供了方便和参考依据<sup>[16]</sup>。

### 1 加速功率型 PSS2A 的工作原理

PSS2A 的数学模型如图 1 所示, 分别引入机械转速  $\omega$  和电功率  $P_e$  两个信号叠加合成一个加速功率信号  $\Delta P_a$ 。其中:  $G_1(s) \sim G_4(s)$  为隔直环节;  $G_5(s)$ 、 $G_6(s)$  为惯性环节;  $G_7(s)$  为低通滤波器, 可消除轴系扭转振荡及噪声等高频信号的影响;  $K_{s1}$  为增益, 确定了产生阻尼的大小, 理想情况下应设计在对应最大的阻尼值下, 一般通过临界增益试验确定;  $G_8(s)$ 、 $G_9(s)$  为超前-滞后环节, 其参数的选取确定了 PSS2A 补偿角度的大小。

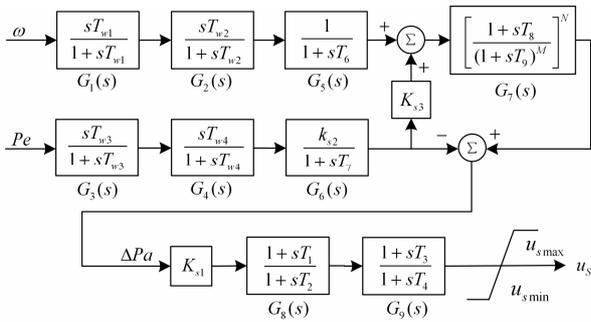


图 1 加速功率型 PSS2A

Fig. 1 Improved rotational speed PSS2A

### 2 基于输入信号留数法的原理

对一个线性时不变系统进行拉普拉斯变换如图 2 所示, 可得到:  $Y(s) = G(s)I(s)$ , 式中  $Y(s)$ 、 $G(s)$ 、 $I(s)$  分别为系统的输出函数、传递函数和输入函数的拉普拉斯变化。

设图 2 系统  $G(s)$  的传递函数为

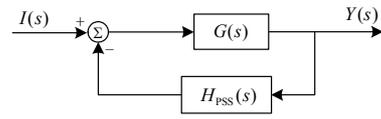


图 2 闭环系统传递函数框图

Fig. 2 Transfer function diagram of close loop system

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (1)$$

式中:  $R_i$  是留数;  $\lambda_i$  是极点。

设输入  $I(s)$  由有限项延迟因子  $c_i (i=0,1,\dots,k)$  及同样的特征值  $D_j (j=1,2,\dots,k)$  组成, 表示为

$$I(s) = \frac{(c_0 + c_1 e^{-sD_1} + c_2 e^{-sD_2} + \dots + c_k e^{-sD_k})}{s - \lambda_{n+1}} \quad (2)$$

考虑输入函数  $I(s)$  后, 输出函数  $Y(s)$  为

$$Y(s) = (c_0 + c_1 e^{-sD_1} + \dots + c_k e^{-sD_k}) \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(s - \lambda_i)(s - \lambda_{n+1})} \quad (3)$$

则留数表达式为

$$R_j = \frac{b_j (\lambda_j - \lambda_{n+1})}{\sum_{i=0}^k c_i e^{\lambda_j (D_k - D_i)}} \quad (4)$$

式中:  $b_j = a_j e^{j\theta_j}$  和  $\lambda_j$  可采用 TLS-ESPRIT 算法对输出信号进行参数拟合估计求得;  $c_i$ 、 $D_i$  和  $\lambda_{n+1}$  则可以根据已知的输入信号得到。

根据留数  $R_j$  可得到  $j$  模态下需要补偿的角度为

$$\varphi = 180^\circ - \arg R_j \quad (5)$$

对于已确定的补偿角度可根据式(6):

$$\beta = \frac{1 - \sin(\varphi/2)}{1 + \sin(\varphi/2)} \quad (6)$$

确定超前-滞后环节的参数为

$$\begin{cases} T_1 = T_3 = \frac{1}{2\pi \cdot f_i \sqrt{\beta}} \\ T_2 = T_4 = \beta T_1 \end{cases} \quad (7)$$

### 3 TLS-ESPRIT 算法的基本原理

电力系统中常见的信号模型可以表示为幅值按指数规律变化的正弦信号与噪声的叠加。在采样时刻  $n$ , 其表达式为

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k e^{j\phi_k} e^{(-\sigma_k + j\omega_k)nT_s} + w(n) \quad (8)$$

式中:  $p$  为信号实际含有实正弦分量个数的 2 倍;

$T_s$  为信号的采样周期;  $a_k$ 、 $\phi_k$ 、 $\sigma_k$ 、 $\omega_k$  分别为第  $k$  个正弦曲线中的初始振幅、初始相位、阻尼、角频率 ( $k=1,2,\dots,p$ );  $w(n)$  为噪声。令

$$x(n) = \sum_{j=1}^p c_j \lambda_j^n + w(n) \quad (9)$$

式中:  $c_j = a_j e^{j\phi_j}$ ;  $\lambda_j = e^{(-\sigma_k + j\omega_k)T_s}$  为信号极点。

定义  $M$  个数据向量:

$$\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n+1), \dots, x(n+M-1)]^T \quad (10)$$

根据采样数据序列形成的 Hankel 矩阵如下:

$$\mathbf{X}_{L \times M} = [\mathbf{x}(0), \mathbf{x}(1), \dots, \mathbf{x}(L-1)]^T = \begin{pmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \dots & x(N-1) \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中:  $L > P$ ;  $M > P$ ;  $L+M-1 = N$ 。

对矩阵  $\mathbf{X}$  进行奇异值分解:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{M}\mathbf{V}^H \quad (12)$$

式中: 上标  $H$  为共轭转置; 对角矩阵  $\mathbf{M}$  为矩阵  $\mathbf{X}$  的奇异值, 其顺序由大到小排列。

对矩阵  $\mathbf{V}$  按奇异值大小可划分为信号子空间  $\mathbf{V}_s$  和噪声子空间  $\mathbf{V}_n$ , 删除  $\mathbf{V}_s$  的第一行和第二行剩下的矩阵分别为  $\mathbf{V}_1$  和  $\mathbf{V}_2$ 。构造矩阵  $[\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2]$  并对其进行奇异值分解:

$$[\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2] = \mathbf{R}\mathbf{A}\mathbf{D}^T \quad (13)$$

令

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

则计算  $\mathbf{D}_{11}\mathbf{D}_{21}^{-1}$  的特征根  $\lambda_k$  ( $k=1,2,\dots,p$ ) 便可确定阻尼  $\sigma_k$  和频率  $f_k$ , 即

$$\begin{cases} \sigma_k = -\frac{\ln|\lambda_k|}{T_s} \\ f_k = \frac{\arg(\lambda_k)}{2\pi T_s} \end{cases} \quad (15)$$

求得各模态的阻尼系数和频率后, 通过最小二乘法可求得各模态的幅值和初始相角。

考察  $N$  点采样信号有:

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\lambda}\mathbf{C} \quad (16)$$

对应代入数据得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) \\ \mathbf{x}(1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \dots & \lambda_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{C} = (\boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\lambda})^{-1} \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{Y} \quad (18)$$

解式(18)便可获得信号的初始幅值  $a_p$  和初始相位  $\phi_p$  的表达式如式(19)所示。

$$\begin{cases} a_p = 2|c_p| \\ \phi_p = \arg(c_p) \end{cases} \quad (19)$$

## 4 算例仿真与分析

### 4.1 加速功率信号分析及 PSS2A 参数整定

实测得水电厂发电机组参数为

$$x_d = 0.9694 \text{ p.u.}, \quad x_q = 0.659 \text{ p.u.}$$

$$x'_d = 0.3582 \text{ p.u.}, \quad x'_q = 0.2404 \text{ p.u.}$$

时间常数:  $T'_{d0} = 3.2397 \text{ s}$ ,  $T_j = 2.16 \text{ s}$ ,  $D = 1$ 。

发电机初始工况:  $P_e = 0.9$ ,  $Q_e = 0.1$ ,  $U_s = 1$ 。

通过频谱仪现场整定的 PSS2A 超前参数:

$$T_1 = 0.15, \quad T_2 = 0.02, \quad T_3 = 0.1, \quad T_4 = 0.02。$$

通过临界增益试验确定增益  $K_{s1} = 3$ , 对于 PSS2A 模型其他环节参数可根据《南方电网电力系统稳定器整定试验导则》整定。

断开 PSS2A 的接入口, 发电机在额定功率因数下运行, 对发电机励磁控制器的 PSS2A 迭加点施加时长为 0.1 s 的小扰动, 并对如图 1 所示的 PSS2A 模型内的加速功率  $\Delta P_a$  进行录波、采样。运用 TLS-ESPRIT 算法拟合得加速功率  $\Delta P_a$  波形如图 3 所示。

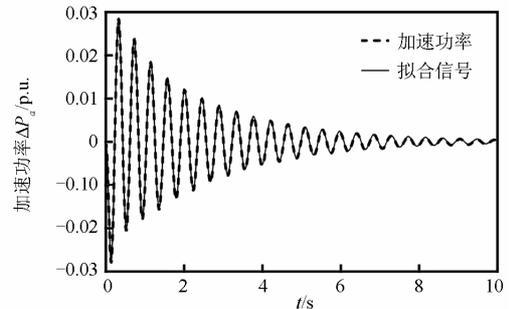


图 3 TLS-ESPRIT 算法拟合加速功率  $\Delta P_a$

Fig. 3 TLS-ESPRIT algorithm for fitting acceleration power

由图 3 可见, 在小扰动激励下, 加速功率信号呈衰减振荡弱阻尼状态, 经过 10 s 后逐渐稳定下来。拟合曲线与真实信号大体一致, 可拟合得到比较准确的信号参数如表 1 所示。

由表 1 可知, 加速功率信号含有五个模态, 其中模态 3 的阻尼为 0.029, 对发电机组振荡起主导作用。

表 1 TLS-ESPRIT 算法拟合参数

Table 1 Parameters fitted by TLS-ESPRIT method

模态	幅值	相角	阻尼	频率
1	0.018	-166.524	0.501	4.023
2	0.045	2.828	0.163	2.489
3	0.027	144.337	0.029	2.277
4	0.006	74.090	0.109	2.053
5	0.037	-100.805	0.929	0.198

根据补偿角度设计运用留数法对模态 3 进行计算得 PSS2A 的两个超前环节参数为  $T_1 = T_3 = 0.248$ ,  $T_2 = T_4 = 0.019$ , PSS2A 的增益及其他环节参数仍取原值不变。

#### 4.2 调功扰动阶跃 10% 状态变量分析

接入 PSS2A, 对比不同的超前环节参数运行到 1 s 时, 调整发电机有功功率给定值阶跃上升 10%, 系统相关状态量  $P_e$ 、 $U_f$ 、 $\Delta\omega$  响应曲线如图 4 所示。

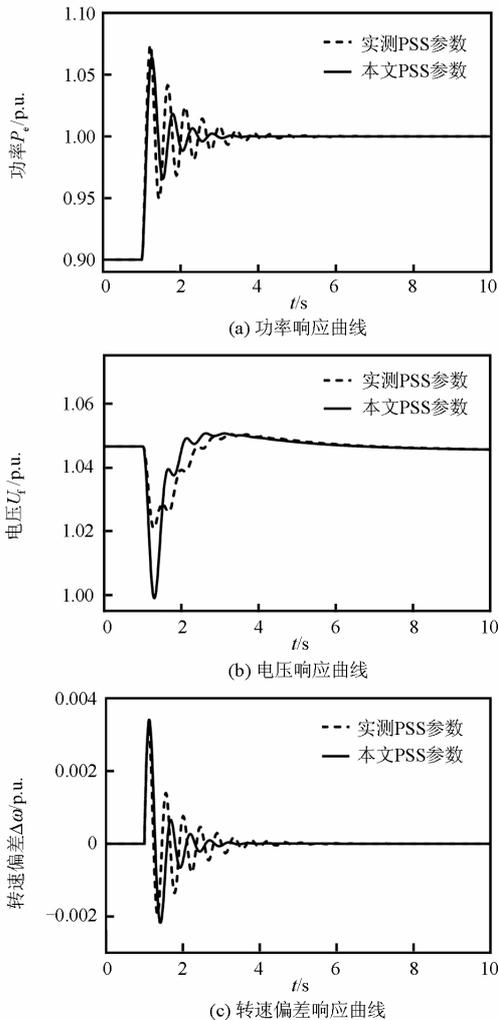


图 4 调功扰动时系统响应曲线

Fig. 4 System responses to power regulation disturbance

由图 4(a)可见, 发电机输出的有功功率在两种不同的超前环节参数下都能迅速跟踪给定值上调 10%, 而本文的参数使得调节时间相对短些, 振荡次数也相对减少, 抑制振荡能力有所提高。发电机端电压经过调整之后逐渐恢复到原来水平, 并没有因为上调机械功率而使得电压有所下降。

#### 4.3 调压扰动阶跃 5% 状态变量分析

接入 PSS2A, 对比不同的超前环节参数运行到 1 s 时发电机端电压给定值阶跃增加 5%, 系统相关状态量  $P_e$ 、 $U_f$ 、 $\Delta\omega$  响应曲线如图 5 所示。

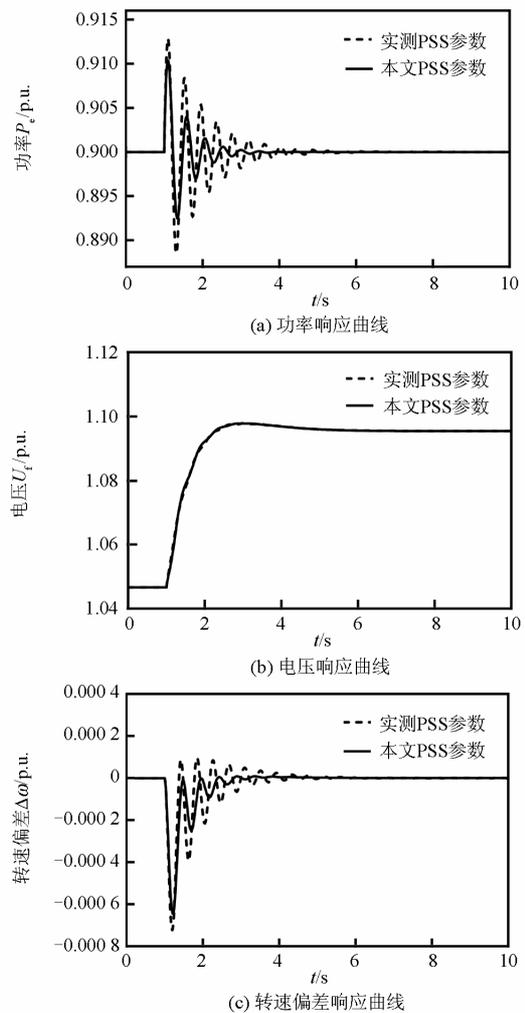


图 5 调压扰动时系统响应曲线

Fig. 5 System responses to voltage regulation disturbance

由图 5 可见, 虽然本文超前环节参数对电压的调整影响不大, 但可较好地抑制同步发电机因调压扰动引起的功率振荡和转速振荡, 不仅减少了振荡的次数, 也削弱了振荡的幅度。

## 5 结语

本文提出了基于 TLS-ESPRIT 算法与留数法相结合的发电机 PSS2A 参数优化方法。通过采用曲线拟合分析励磁系统的加速功率信号的方法得到控制系统的相频特性, 再用留数法求取 PSS2A 参数。该方法得到的整定值可给现场试验提供一定的参考价值, 即在理论值的参考下整定得到工程实际效果较好的控制参数。利用 TLS-ESPRIT 算法可识别电力系统低频振荡的模式及参数<sup>[17]</sup>。留数法则在设计广域系统的 PSS 控制器方面有较突出的实用价值<sup>[18-19]</sup>。

## 参考文献

- [1] 朱方, 赵红光, 刘增煌. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.
- [2] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.  
YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [3] 刘增煌, 方思立. 电力系统稳定器对电力系统动态稳定的作用及与其他控制方式的比较[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 4-10.  
LIU Zenghuang, FANG Sili. The effect of power system stabilizer (PSS) on power system dynamic stability and comparison with other control method[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 4-10.
- [4] 康健, 丁凯. 加速功率型电力系统稳定器输入变量的获取[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 87-88.  
KANG Jian, DING Kai. Discussion on input state variables of an improved rotational speed power system stabilizer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 87-88.
- [5] 杨立强, 王亮, 赵红光, 等. 加速功率型电力系统稳定器的研制[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 57-60.  
YANG Liqiang, WANG Liang, ZHAO Hongguang, et al. Development of power system stabilizer based on PSS2A model of IEEE[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 57-60.
- [6] 吴峰, 鲁晓帆, 陈维荣, 等. 电力系统稳定器参数优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 29-33.  
WU Feng, LU Xiaofan, CHEN Weirong, et al. Research of parameter optimization of power system stabilizer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 29-33.
- [7] 杨立环, 徐峰, 胡华荣, 等. 电力系统稳定器 PSS2A 现场试验及参数整定[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 111-114.  
YANG Lihuan, XU Feng, HU Huarong, et al. Test and parameter-setting of power system stabilizer-PSS2A[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 111-114.
- [8] 侯玉强, 马覃峰, 李威, 等. PSS2 型电力系统稳定器参数的数字仿真整定[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 89-93.  
HOU Yuqiang, MA Qinfeng, LI Wei, et al. The parameter-setting for PSS2-type power system stabilizer with digital simulation[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 89-93.
- [9] 董超, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于数学形态学滤波技术和 TLS-ESPRIT 算法的低频振荡模式辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 114-118.  
DONG Chao, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on mathematical morphology filtering technique and TLS-ESPRIT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 114-118.
- [10] 张静, 徐政, 王峰, 等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 84-88.  
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng, et al. TLS-ESPRIT based method for low frequency oscillation analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 84-88.
- [11] PRAVEEN T, SINGH S N. A modified TLS-ESPRIT-based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 719-727.
- [12] 李宽, 李兴源, 胡楠, 等. 基于经验模态分解自适应滤波的次同步振荡 ESPRIT 分析[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2012, 40(13): 18-23.
- LI Kuan, LI Xingyuan, HU Nan, et al. ESPRIT analysis of subsynchronous oscillation based on the empirical mode decomposition self-adaptive filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 18-23.
- [13] 蒋平, 叶慧, 吴熙. 基于留数的静止同步补偿器附加阻尼鲁棒控制[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 131-135.
- JIANG Ping, YE Hui, WU Xi. Residue-based robust control method for additional damping controller of static synchronous compensator[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 131-135.
- [14] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 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.
- LU Jingjing, GUO Jian, TIAN Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34.
- [15] 高磊, 刘玉田, 汤涌, 等. 提升系统阻尼的多 STATCOM 阻尼控制器协调控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 68-77.
- GAO Lei, LIU Yutian, TANG Yong, et al. Research on the coordinated control among multiple STATCOM based on damping controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 68-77.
- [16] 贾继灏, 马丽丽, 刘宪林. 基于等值单机无穷大系统的多机系统 PSS 设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 70-74.
- JIA Jihao, MA Lili, LIU Xianlin. PSS design in a multi-machine system based on equivalent single machine infinite bus power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 70-74.
- [17] TRIPATHY P, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. A modified TLS-ESPRIT-based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 719-727.
- [18] 袁野, 程林, 孙元章, 等. 基于系统留数矩阵的广域 PSS 设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 1-6.
- YUAN Ye, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Wide area PSS design based on system residue matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 1-6.
- [19] 袁野, 孙元章, 程林. 基于多信号在线辨识的广域 PSS 协调设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 14-19.
- YUAN Ye, SUN Yuanzhang, CHENG Lin. Wide area PSS coordinated design based on multi-signal online identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 14-19.

---

收稿日期: 2014-11-11; 修回日期: 2015-03-14

**作者简介:**

李啸聪(1959-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统分析与控制、电力系统非线性控制; E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn

陈葆超(1987-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail:justdoit1370@qq.com

(编辑 张爱琴)