

多机电力系统PSS参数优化新方法

郝正航¹, 李少波², 周杰娜¹, 文 方¹

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 贵州大学 CAD技术中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 机械回路谐振引起了励磁系统频率特性曲线出现“波峰”和“波谷”, 造成现有方法不易准确测量或计算励磁系统相位滞后角. 为此, 本文提出一种新的多机系统PSS参数优化方法. 首先, 重新定义基于多机模型的励磁系统相位滞后角, 并推导出相应的计算公式, 基于新定义的计算方法不再受机械回路谐振的影响, 可以得出更合理的计算结果. 然后, 在PSS增益整定时, 将问题描述转化为多机系统部分输出量反馈的优化模型, 通过求解Levine-Athans方程组得到最佳PSS增益. 最后将所提方法应用于一个8机电力系统, 与传统方法比较后, 表明电力系统阻尼特性得到进一步改善.

关键词: 电力工程; 电力系统稳定器; 参数优化; 动态稳定; 励磁控制; 频率特性; 低频振荡
中图分类号: TM761 **文献标识码:** A

Novel approach of parameter optimization for multi-machine power system stabilizers

HAO Zheng-hang¹, LI Shao-bo², ZHOU Jie-na¹, WEN Fang¹

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550003, China;
2. Institute of CAD, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550003, China)

Abstract: Frequency characteristic curves of excitation systems always arise or sink sharply at the frequency of mechanical loop-resonance. This is the reason why phase-lagging angles of excitation systems are difficult to be measured or calculated accurately. In this paper, a novel method of power system stabilizer(PSS) optimization for multi-machine system is presented. Firstly, based on the multi-machine power system model, a new definition of phase-lagging angles for excitation systems is built, and the corresponding algorithm is derived simultaneously. The proposed definition and its algorithm produce more reasonable calculation results, which are not influenced by the resonance of mechanical loops. Secondly, The mathematical model used for setting PSS gain can be described by another control problem, which optimizes partial feedback variables in a multi-machine power system. So, the best gain of PSS is obtained by solving Levine-Athans equations. Finally, using an eight-machine test system, the proposed approach and traditional method are compared. Simulation result shows that the new method mentioned in this paper is helpful to damping performance.

Key words: power technology; power system stabilizers; parameter optimization; dynamic stability; excitation control; frequency characteristics; low-frequency oscillations

1 引言(Introduction)

电力系统稳定器(PSS)由于物理概念清晰, 电路简单, 调试方便, 已被世界各国普遍接受和采用. PSS在我国电力系统的应用非常广泛. 特别近几年, 大区电网多次出现功率振荡现象和事故, 一些电网公司对当前电力大系统的动稳定问题极为关注, 甚至强制性要求所辖统调主力发电机组必须全部投入PSS以增强系统阻尼. 但是理论研究和运行实践都表明, PSS有效发挥阻尼作用的前提是合理的参数整定. PSS参数不仅要与本机的励磁系统及AVR相

配合, 而且还要重视与全系统动态元件的协调与优化. 因此, 多机电力系统PSS参数整定工作既特别重要又有相当难度, 虽然国内外学者已经进行了较多的研究, 但至今尚未形成确定的结果可以应用.

文[1~3]分别利用模拟退火、二次规划和进化策略等现代优化算法寻求能使主导模式达到最大阻尼的参数组. 从数学意义上讲, 这类方法可以找到与最大阻尼对应的最佳PSS参数, 从而使系统小干扰稳定性达到最优. 但是, 这些方法放弃了PSS相位补偿环节的物理意义, 整定结果可能导致较多的过

补偿或欠补偿,其利弊值得推敲. 文[4]提出了测试信号法PSS设计,以仿真试验的手段测出励磁系统的相位滞后,进而设计PSS相位校正环节. 该方法几乎不需要任何设计计算,且易于综合多种运行方式. 但是采用了传统相频测量方法,测量结果可能不准确,PSS整定参数因此而有误差. 文[5]介绍了基于改进选择模式法(改进SMA法)的PSS参数设计. 该方法相位补偿环节考虑到全局信息,相位补偿度有理论依据,在使用专用计算工具时,整定工作简单快捷,但改进SMA法在多机PSS增益协调时较为随意而没有确定方法. 文[6]利用留数法和特征向量理论进行PSS参数协调. 该方法与改进SMA法并无本质区别,二者有相同的优缺点.

本文提出了一种新的PSS参数整定方法,包括两项内容:第一,指出了传统相频特性测量或计算存在的问题,给出了一种改进定义和相应计算方法,确保了励磁系统滞后相位的准确补偿;第二,提出一种多机PSS增益优化方法,通过模型构造,使之成为部分输出量反馈最优控制问题,求解Levine-Athans方程组得到最佳增益向量. 最后与两种传统方法对比证明,所提方法正确有效,实现了多机PSS的全局协调,阻尼效果令人满意.

2 多机系统PSS参数整定方法(Method of tuning PSS parameters in multi-machine system)

2.1 多机电力系统的非线性动力学模型(Nonlinear dynamic model of multi-machine system)

设发电机采用3阶实用模型,励磁机采用1阶惯性环节. N 机电力系统的动力学模型可表示为^[7]

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0, \\ H_{ji} \frac{d\omega_i}{dt} = \omega_{i0} [P_{mi} - P_{ei} - D_i (\frac{\omega_i}{\omega_0} - 1)], \\ T'_{di0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fdi} - E_{qi}, \\ T_{ei} \frac{dE_{fdi}}{dt} = -E_{fdi} + K_{ei} U_{ei}, \\ P_{ei} = [E'_{qi} + (X_{qi} - X'_{di}) I_{di}] I_{qi}, \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_{ei} 为第 i 台机的励磁控制量,对 U_{ei} 的数学表达就是拟求取的控制规律. 式(1)中其余物理量的名称及意义,以及描述机网接口坐标变换和潮流约束的代数方程参见文[7].

2.2 装有PSS的多机系统控制规律的表达(Control law of multi-machine system with PSS)

如图1所示,AVR+PSS的控制结构需要反馈本地的发电机转速 $\Delta\omega_i$ 和机端电压 V_{ti} ,并以机端电压偏差和PSS输出叠加后形成控制量 U_{ei} . 只要确定了PSS传递函数的有关参数,控制量 U_{ei} 也就相应确定^[8]. 因此,在 $K_{V_{ti}}$ 确定的条件下,PSS的全部参数决定了励磁控制规律.

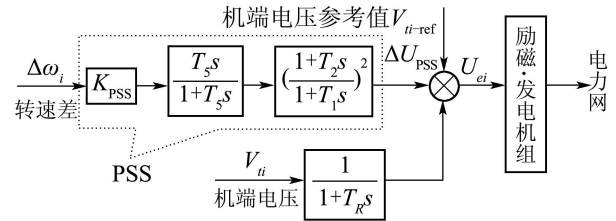


图1 AVR+PSS控制器结构框图

Fig. 1 Control block diagram of AVR+PSS

PSS由隔直环节、相位补偿环节和增益环节组成,虽然有多个参数,但根据PSS的工作机理可知,其关键参数只有两个,即相位补偿度 φ 和增益 K_{PSS} . 因此,PSS参数整定工作可分为两个步骤,即相位补偿度计算与增益优化.

2.3 测量相位补偿度的困难与改进计算方法(Difficulty in measuring phase compensation degree and improved method)

文[9]指出,在AVR参考电压处激励,在发电机端测量电压响应,激励至响应的相位滞后就是励磁系统的滞后,即PSS应该补偿的角度. 这是相位补偿的原始定义. 但是,依此方法计算或测量出的相位滞后角度是不准确的,其原因是一般动力学系统在谐振频率处的相频特性曲线总是存在“波峰”或“波谷”^[10],电力系统也是如此. 由于谐振频率附近相频曲线不平滑,故无法精确测量.

为了说明这一问题,以图2的EPRI-36电力系统为例,按照励磁系统相频特性的原始定义(传统方法),基于MATLAB仿真平台计算出发电机G3相频曲线如图3中的虚线所示(其他发电机类似). 可以看到在0.3 Hz~1.3 Hz频段,相频曲线“跌落”,计算出的滞后角度约为 $-100^\circ \sim -150^\circ$,表现的是超前特性,完全违背了理论分析;在1.3 Hz~2.5 Hz频段滞后角度约 $80^\circ \sim 120^\circ$,才表现出合乎理论的滞后特性. 可见传统方法难以给出正确的励磁系统相位滞后角. 关于相频曲线在特征频率附近“跌落”的问题,在PSS调试现场也曾得到过证实^[11]. 为此,本文提出了励磁系统相位滞后特性的严格定义和计算方法. 不但避开了机械谐振现象,而且更具理论上的严谨性.

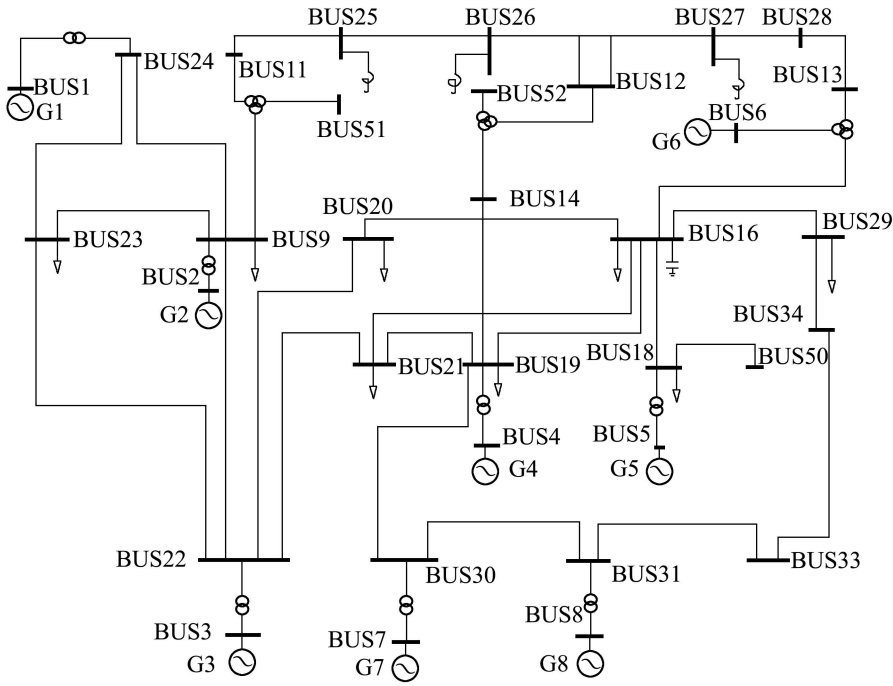


图2 8机36节点电力系统

Fig. 2 8 machine 36 bus power system

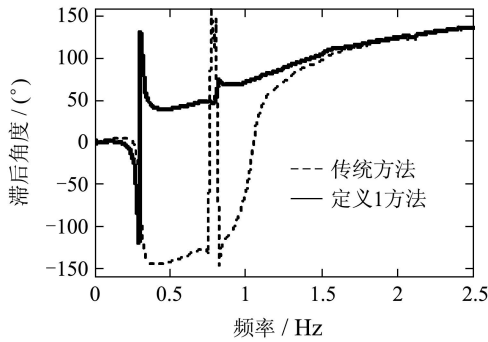


图3 励磁系统频率特性

Fig. 3 Frequency characteristics of excitation system

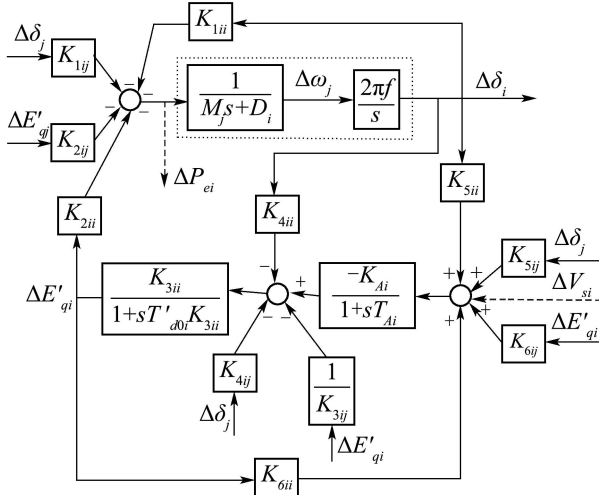


图4 Heffron-Phillips多机模型

Fig. 4 Heffron-Phillips model of multi-machine

定义1 在图4所示的 N 机电力系统模型中,

第 i 台机励磁系统相位滞后角 φ_i 为本机机械回路断开(删除虚线框部分)状态下, 以 ΔV_{si} 为输入, 以 ΔP_{ei} 为输出的SISO系统 $G(s)$ 的相位滞后, 即

$$\varphi_i = -\angle G_i(s) |_{s=j\omega}. \quad (2)$$

其中

$$G(s) = \frac{\Delta P_{ei}(s)}{\Delta V_{si}(s)}.$$

定义1中强调断开第 i 台机机械回路, 这是与传统方法的区别, 目的有二: 其一是理论上应该这样处理, 是严格而非随意的; 其二是消除谐振引起的偏差. 断开机械回路只能通过修改数学模型达到, 而对于实际电力系统是无法断开机械回路的. 所以传统实测方法难以得到准确的励磁系统相位滞后角度. 而定义1的方法则可以得到准确的滞后角. 另外, 该定义给出的励磁系统相位滞后角不仅考虑到本机励磁系统参数, 而且计及了全系统动态行为.

下面讨论 $G_i(s)$ 的计算方法. $G_i(s)$ 是基于图4定义的传递函数, 图4所示的系统框图并不完整, 仅仅给出了第 i 台机的全部模型, 其余发电机仅以关联信号表示. 完整的传递函数框图包括了多分支、多回路. 为此, 需采用状态空间法计算 $G_i(s)$.

对式(1)的非线性动力方程在典型运行点处偏差化和线性化, 得到电力系统线性化模型:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E'_{q1}, \Delta E_{fd1}, \dots,$$

$$[\Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E'_{qN}, \Delta E_{fdN}]^T.$$

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{4N \times 1}$ 为状态向量, $A \in \mathbb{R}^{4N \times 4N}$ 为系统矩阵. $\mathbf{x}$ 中各状态变量的名称、意义以及系统矩阵 A 的形成方法在文[5]中有详细论述. 将式(3)表达的原系统化为定义1要求的SISO系统, 分两个步骤进行:

1) 在第 i 台机AVR参考电压点施加输入信号 ΔV_{si} , 在加速功率处测量输出信号 ΔP_{ei} (如图2中虚箭头所示).

2) 删除或断开第 i 台机的机械回路(虚线框部分).

按以上2个步骤操作, 原系统化为了一个SISO系统 $G_i(s)$, 设与之对应的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = A_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{b}_1 u, \\ y_1 = \mathbf{c}_1 \mathbf{x}_1. \end{cases} \quad (4)$$

其中 A_1 可在 A 的基础上划去与第 i 台机转子运动方程对应的行和列, 即划掉 $\Delta\omega_i, \Delta\delta_i$ 对应的行和列而得到

$$\begin{aligned} u &= \Delta V_{si}, \quad y_1 = \Delta P_{ei}, \\ \mathbf{b}_1 &= [0, 0, \dots, \frac{1}{T_{Ai}}, \dots, 0]^T, \\ \mathbf{c}_1 &= [K_{1i1}, 0, K_{2i1}, 0, \dots, K_{2ii}, \dots, \\ &\quad K_{1iN}, 0, K_{2iN}, 0]^T. \end{aligned}$$

根据线性系统理论, $G_i(s)$ 可由它的状态空间表达式(4)得到, 即

$$G_i(s) = \mathbf{c}_1 (SI - A_1)^{-1} \mathbf{b}_1. \quad (5)$$

根据式(5)再次计算图2算例中发电机G3励磁系统相频曲线, 结果如图3中的实线. 可以看到在0.2 Hz ~ 2.5 Hz频段相频特性没有跌落问题, 都表现出滞后特性, 在大于1.5 Hz的高频段和传统定义所得结果趋于一致.

2.4 PSS增益优化(Optimization of PSS gain)

PSS参数整定的第2个步骤是确定合适的增益. 对于单机无穷大系统, 在准确相位补偿前提下, 可以证明附加信号提供的阻尼转矩和PSS增益成正比. 在较大范围内(譬如: $0 < K_{PSS} < 15$), 机电阻尼随 K_{PSS} 的增大而增大. 但在多机系统中这一规律却不适用. 原因在于增加某一发电机PSS增益可以增大本机阻尼, 但同时可能削弱其他发电机阻尼^[12]. 因此, 多机系统PSS增益的全局协调至关重要. 用2.3节方法确定各机相位补偿度之后, PSS传递函数中各时间常数即可确定^[11]. 根据问题的需要, 建立相应模型常常能使问题得到转化并解决^[13~16]. 为此, 拟将PSS增益的全局协调转化为

输出反馈优化问题, 通过求解Levine-Athans方程组可求出最佳增益阵. 为了构造最优输出反馈问题的数学模型, 应建立含有PSS的全系统状态空间表达式. 根据PSS传递函数框图(图1), 可列出相应的状态方程和输出方程, 如式(6)(7):

$$\begin{cases} T_5 s y_{1i} = -y_{1i} + \Delta\omega_i, \\ T_2 s y_{2i} = -(1-a)y_{1i} - y_{2i} + (1-a)\Delta\omega_i, \\ T_2 s y_{3i} = -a(1-a)y_{1i} + (1-a)y_{2i} - \\ \quad y_{3i} + (1-a)a\Delta\omega_i, \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta U_{PSSi} = y_{3i} + a y_{2i} + a^2 \Delta\omega_i - a^2 y_{1i}. \quad (7)$$

其中: $a = \frac{T_1}{T_2}$, s 为微分算子. 在式(3)基础上增加PSS状态方程和输出方程, 得到含有PSS的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_2 = A_2 \mathbf{x}_2 + B_2 \mathbf{u}, \\ y_2 = C_2 \mathbf{x}_2. \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_2 &= [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E'_{q1}, \Delta E_{fd1}, \dots, \\ &\quad \Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E'_{qN}, \Delta E_{fdN}, y_{11}, \\ &\quad y_{12}, y_{13}, \dots, y_{1N}, y_{2N}, y_{3N}]^T, \\ \mathbf{y}_2 &= [\Delta U_{PSS1}, \Delta U_{PSS2}, \dots, \Delta U_{PSSN}]^T, \\ \mathbf{u} &= [\Delta V_{s1}, \Delta V_{s2}, \dots, \Delta V_{sN}]^T. \end{aligned}$$

式(8)中 A_2 是在 A 的基础上增加与式(6)方程系数相对应的分块矩阵而得到的. $B_2 = \text{blockdiag}\{[0, 0, 0, \frac{1}{T_{Ai}}, \dots, 0]^T\}$, C_2 是与式(7)方程系数对应的输出矩阵. 由于将PSS输出作为了系统输出量, 所以PSS的增益优化问题转化为求解最优输出反馈增益阵的问题. 设标准线性系统式(8)的最优控制量为

$$\mathbf{u} = K \mathbf{y}_2,$$

K 就是PSS的最优增益(向量). 即

$$K = \begin{bmatrix} K_{PSS1} & & & \\ & K_{PSS2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & K_{PSSN} \end{bmatrix}.$$

3 实例分析(Simulation example)

为检验本文方法的正确性, 以图2测试系统为例整定其参数. 各发电机励磁系统参数统一取为: $K_{Ai} = 100$, $T_{Ai} = 0.1\text{s}$. 首先按2.3节方法求取相位补偿度, 然后按2.4节方法构造模型并用快速直接迭代法求解Levine-Athans方程组得到最佳PSS增益. 表1给出了上述两个步骤得到的各发

电机PSS相位补偿度及其增益.

表 1 PSS的相位补偿度和增益

Table 1 Compensatory phase and gain of PSS

发电机	相位补偿度(φ_i)	增益(K_{PSSi})
G1	64.3	16.3
G2	117.9	5.11
G3	81.5	8.05
G4	105.1	7.11
G5	74.4	5.08
G6	144.4	9.31
G7	60.5	3.05
G8	53.9	11.09

为了验证表1整定结果的有效性,需与传统方法进行小干扰稳定和暂态稳定性的比较.为此,分别采用单机无穷大系统等值法^[8]、改进 SMA法^[5]和本文方法设计PSS,表2给出了装设于上

述3种方法的PSS后系统的阻尼效果(特征分析),图5~图7分别给出了短路扰动下发电机转子摇摆曲线.

算例系统在没有投入PSS时,有3个负阻尼模式(文中未给出).当采用单机无穷大等值法设计PSS并投入后,负阻尼模式消失,但仍有2个机电模式阻尼较弱 $< 6\%$,大干扰时表现为较长时间的持续振荡(图5);当采用改进SMA法设计并投入PSS后,阻尼特性和大干扰下功角摇摆过程都有明显改善(图6),该方法优于单机系统等值法,但仍有一个较弱模式;当采用本文方法整定PSS参数并装设于系统后,机电模式阻尼令人满意,而且大干扰下的转子摇摆过程短暂而平稳(图7).可见该方法与改进SMA法相比又有显著提升.但也应注意到,3种励磁规律对转子首摆幅度的作用差别不大,这是励磁控制固有的局限性.因此,汽门控制可能是进一步提高首摆稳定的途径^[17,18].

表 2 安装基于不同方法设计的PSS后系统机电模式及阻尼百分数

Table 2 Electromechanical modes and damping ratio based on different PSS

单机系统等值法		改进SMA法		本文方法	
机电模式	阻尼百分数	机电模式	阻尼百分数	机电模式	阻尼百分数
$-0.2414 \pm 4.1814i$	5.7638	$-0.4168 \pm 4.6320i$	8.9610	$-1.0484 \pm 6.0045i$	17.1999
$-0.6815 \pm 14.4758i$	4.7027	$-0.5963 \pm 6.0248i$	9.8490	$-1.3065 \pm 5.5726i$	22.8261
$-0.5421 \pm 4.9183i$	10.9566	$-0.7279 \pm 14.3618i$	5.0617	$-1.2137 \pm 15.5199i$	7.7967
$-0.5307 \pm 4.5481i$	11.5896	$-1.0897 \pm 5.5853i$	19.1495	$-1.1261 \pm 3.9530i$	27.3975
$-1.3633 \pm 3.9329i$	32.7530	$-0.9865 \pm 9.0316i$	10.8584	$-1.6005 \pm 8.9078i$	17.6842
$-1.3918 \pm 4.5258i$	29.3947	$-1.3708 \pm 3.9532i$	32.7626	$-1.1382 \pm 3.5762i$	30.3287
$-2.4456 \pm 18.9942i$	12.7703	$-1.4632 \pm 4.4786i$	31.0552	$-1.6157 \pm 4.0998i$	36.6646

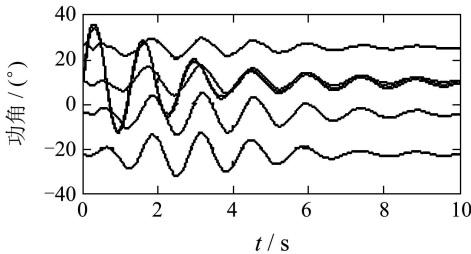


图 5 装设单机等值法的PSS后功角响应

Fig. 5 Power angle response based on traditional PSS

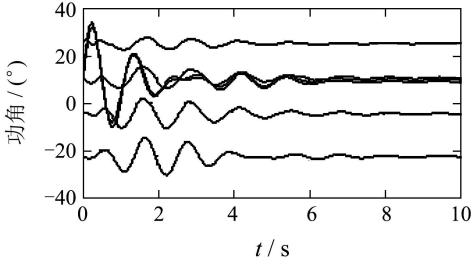


图 6 装设改进SMA法的PSS后功角响应

Fig. 6 Power angle response based on modified SMA PSS

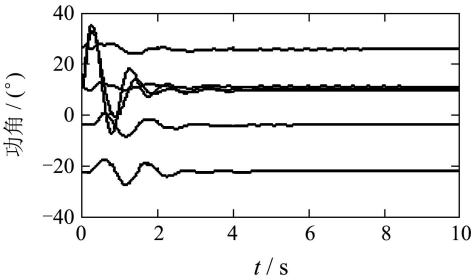


图 7 装设本文方法的PSS后功角响应

Fig. 7 Power angle response based on proposed PSS

4 结论(Conclusion)

现有的多机系统PSS参数优化方法虽然采用先进的全局优化手段,但其目标函数本身的性质决定了这类方法只能找到系统最佳阻尼,而不能从理论上保证PSS准确的相位补偿.如果放弃了相位补偿的准确性要求,单纯追求阻尼指标,就与一般多变量系统优化设计没有了区别.所以PSS参数优化建议按两个步骤先后进行,首先计算励磁系

统滞后度,而励磁系统的滞后不仅与本机励磁系统结构参数有关而且还应该考虑全系统动态行为,宜采取直接准确计算,这一步无须通过优化得到;然后优化全系统PSS增益,多机系统PSS增益调整对不同模式阻尼影响是相互矛盾、彼此消长的,故须引入协调思想与优化手段,对多机电力系统PSS增益优化非常必要。

参考文献 (References):

- [1] ABIDO M A. Parameter optimization of multimachine power system stabilizers using genetic local search[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2001, 23(8): 785 – 794.
- [2] CAI L J, ERLICH I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(1): 294 – 300.
- [3] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统PSS参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22 – 27.
(NIU Zhenyong, DU Zhengchun, FANG Wanliang, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers using evolutionary strategy[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2004, 24(2): 22 – 27.)
- [4] XU Z, SHAO W, ZHOU C C. Power system small signal stability analysis based on test signal[C]//*Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference(PSCC)*. Sevilla, Spain: PSCC Publisher, 2002: 24 – 28.
- [5] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. *Theory and Analysis of Dynamic Power System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [6] PAGOLA F, PEREZ-ARRIAGA I C, GEORGE C V. On sensitivities, residues and participation: applications to oscillatory stability analysis and control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(1): 278 – 285.
- [7] 韩英铎, 王仲鸿, 陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(HAN Yingduo, WANG Zhonghong, CHEN Huaijin. *Optimal Decentralized Coordinated Control for Power Systems*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)
- [8] KUNDUR P. *Power System Stability and Control*[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [9] LARSON E V, SWANN S A. Applying power systems stabilizers, part 1: General concepts; part 2: Performance objectives and tuning concepts; part 3: Practical consideration[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, 100(9): 3017 – 3046.
- [10] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
(FU Zhifang, HUA Hongxing. *Modal Analysis Theory and Application*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.)
- [11] 方思立, 谭有信, 黄文灵. 电力系统稳定器参数计算及调试方法[J]. 中国电力, 2000, 33(6): 29 – 32.
(FANG Sili, TAN Youxin, HUANG Wenling. Power system stabilizer parameter calculation and method of debugging[J]. *Electric Power*, 2000, 33(6): 29 – 32.)
- [12] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7 – 11.
(ZHAO Shuqiang, CHANG Xianrong, HE Renmu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2004, 24(5): 7 – 11.)
- [13] 钟志勇, 谢志棠, 王克文. 适用于电力系统动态稳定分析的元件建模新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 30 – 33.
(ZHONG Zhiyong, XIE Zhitang, WANG Kewen. A novel modeling technique for modern power system dynamic studies[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2000, 20(3): 30 – 33.)
- [14] 李兴源, 邵震霞, 汤广福. 多馈入高压直流输电系统的分散协调控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 7 – 12.
(LI Xingyuan, SHAO Zhenxia, TANG Guangfu. Study on decentralized coordinated control for multi-infeed HVDC transmission system[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(16): 7 – 12.)
- [15] 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 Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(11): 6 – 11.)
- [16] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 1 – 5.
(ZHU Fang, TANG Yong, ZHANG Dongxia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grids in China and their solutions[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(15): 1 – 5.)
- [17] 蒋铁铮, 陈陈, 艾芊. 汽轮发电机主汽门开度的非线性最优预测控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 458 – 462.
(JIANG Tiezheng, CHEN Chen, AI Qian. Nonlinear optimal predictive controller for main steam valve of turbine generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 458 – 462.)
- [18] 王宝华, 杨成梧, 张强. 发电机的非线性自适应逆推综合控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 60 – 64.
(WANG Baohua, YANG Chengwu, ZHANG Qiang. Integrated nonlinear adaptive backstepping controller for synchronous generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 60 – 64.)

作者简介:

郝正航 (1972—), 男, 副教授, 硕士, 已发表论文20余篇, 研究方向为交直流电力系统分析与控制、FACTS技术, E-mail: haozhenghang@163.com;

李少波 (1973—), 男, 贵州大学CAD/CIMS工程技术中心教授, 在中国科学院获博士学位, 研究方向为复杂机电系统设计计算与优化;

周杰娜 (1958—), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、电网规划等;

文方 (1959—), 男, 教授, 研究方向为复杂系统优化控制。