

采用广域测量信号的 PSS 参数优化设计

杨晓静,赵书强,马燕峰

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,河北 保定 071003)

摘要: 为了解决传统的电力系统稳定器 PSS(Power System Stabilizer)因局限于反馈本地信号而不能很好地抑制区域模式的问题,针对区域模式装设引入广域测量信号的 PSS,针对地区模式装设引入本地信号的 PSS。根据参与因子确定 PSS 装设地点,然后应用遗传算法对其参数进行协调。由于 PSS 反馈远方信号,设计时考虑了通信延迟的影响。算例表明,提出的方案能够较好地抑制低频振荡。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 广域测量系统; 电力系统稳定器; 遗传算法

中图分类号: TM 712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)03-0047-04

0 引言

电力系统低频振荡问题正随着系统规模扩大、互联及大型机组快速励磁系统的应用而日益突出,尤其是区域模式的低频振荡对互联电网的安全运行构成了严重威胁。迄今,在发电机励磁系统上安装电力系统稳定器 PSS(Power System Stabilizer)仍然是抑制低频振荡的一种最经济有效的方法。传统的 PSS 通常反馈本机局部信号(如转子转速、电磁功率等),这些信号不能很好地反映区域间的振荡模式,对区间模式的可见性不好^[1-2],从而导致传统 PSS 抑制区域模式低频振荡的效果不如抑制地区模式效果明显。当用于抑制区域模式时,会出现多个 PSS 参数协调的困难^[3]。因此,在 PSS 中引入远方信号对于抑制低频振荡是非常必要的。近年来,以相角测量装置(PMU)为基本单元的广域测量系统迅速发展,它可以高精度同步采集广域电网的实时运行参数,提供电网全局的动态信息^[4],从而为设计反馈远端信号的 PSS 提供了可能。但此时必须重视通信延迟问题,否则所设计的控制器在实际应用中性能将恶化^[1,5]。文献[2,4,6]研究了基于广域测量系统(WAMS)信号的全局电力系统稳定器,取得了优于分散配置的

PSS 的控制效果,但都没有考虑通信时延问题。同时,相对于相位补偿、特征值灵敏度分析以及极点配置等传统方法,遗传算法由于具有搜索不依赖于梯度信息、鲁棒性好、全局收敛性、通用性强、无可微性等特点能够更好地解决 PSS 参数优化问题。

基本以上讨论,本文针对一个四机两区域系统,首先根据特征值分析结果,在与地区模式强相关的机组上装设反馈本机转速信号的 PSS,在与区域模式强相关的机组上装设反馈区域间相对功角差和相对转速差的 PSS,然后应用遗传算法对 PSS 参数进行优化。PSS 模型中引入了代表通信延迟的环节。仿真结果表明上述方法能够有效地抑制低频振荡特别是区域间低频振荡。

1 基于遗传算法的控制器参数协调

1.1 系统的小干扰线性化模型

当系统遭受小干扰时,可以用线性化系统模型研究原来非线性系统的稳定性。根据文献[7],将代表各环节数学模型的微分方程和代数方程线性化和偏差化,确定状态变量,消去中间变量,得到一阶线性微分方程组即系统的状态方程为

$$\dot{X}=AX \tag{1}$$

1.2 控制系统结构及优化算法目标函数的确立

控制系统是由所有反馈本地信号和广域测量信

收稿日期: 2005-07-08

号的 PSS 组成,其结构示意图见图 1, Gen 代表发电机。整个系统可以看作是由 2 层构成:第 1 层是用来抑制本地模式、在其强相关机组上装设的以本机转速信号为输入的 PSS;第 2 层是用来抑制区域模式、在其强相关机组上装设的以区域间相对功角差和相对转速差为输入的 PSS。为方便,上述 2 种 PSS 在图 1 中分别以 LPSS (Local PSS), GPSS (Global PSS) 表示。由于 PSS 的安装地点是根据参与因子的大小而确定,所以对某一特定机组而言,可能只存在第 1 层或者第 2 层,可能两者都不存在,也可能两者兼有,只需闭合、打开图 1 中相应的开关即可。

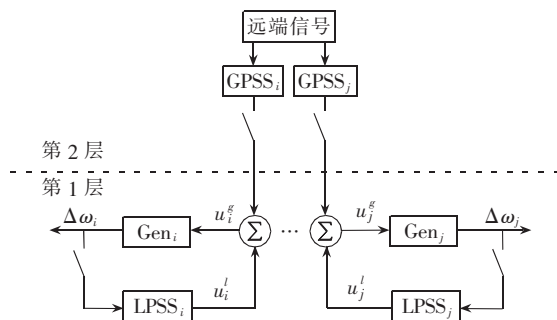


图 1 两层控制系统结构示意图

Fig.1 Structure of two-level control system

PSS 的传递函数框图如图 2 所示。反馈远方信号时存在通信时延问题,图中 τ_{Ri} 为通信延迟时间常数。根据文献[5],通信延迟通常为 30~80 ms,本文考虑最坏的情况 80 ms。

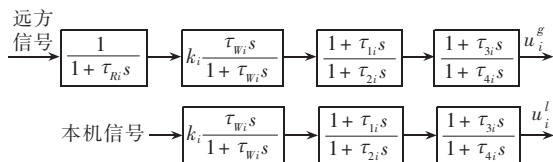


图 2 PSS 传递函数框图

Fig.2 The transfer function block diagram of PSS

将式(1)所示的小干扰线性化模型和图 2 所示的 PSS 模型进行联立,得到系统的状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_1 \quad (2)$$

式中 $\mathbf{X}_1, \mathbf{A}_1$ 分别为加入 PSS 后的增广状态向量和增广状态矩阵。

由于阻尼比是度量系统动态性能的重要指标,所以本文采用如下目标函数:

$$J = \min(\xi_i) \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中 ξ_i 为矩阵 $\mathbf{A}_1$ 中机电模式特征值的阻尼比,其选择原则是频率范围在 [0.1, 2.5] 之间,机电回路相关比 $\rho_i \gg 1$ 。

式(3)代表所有机电振荡模态的最小阻尼比, PSS 参数优化的目标就是使其最大。同时,考虑到控制器参数不越限以及所有特征根实部均小于零的限制, PSS 参数协调可以表述为带约束的优化问题:

$$\begin{aligned} \max J \\ \text{s.t. } K_i^{\min} < K_i < K_i^{\max} \\ \tau_i^{\min} < \tau_i < \tau_i^{\max} \\ \text{Re}(\lambda_i) < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

1.3 遗传算法用于 PSS 参数协调

遗传算法(GA)是一种模拟生物进化过程的并行全局随机寻优算法,它在待优化的参数空间随机选择初始群体,使用遗传算子(如选择、交叉、变异等)对初始种群进行运算,产生新的个体,根据优胜劣汰的自然法则产生新一代种群,对于新种群可以继续使用遗传算子进行运算,如此往复可以得到优化的结果。理论研究表明,只要有足够的进化代数,遗传算法就可以搜索到全局最优解。此外其潜在的并行处理能力、强鲁棒性和智能化等特点使其得到日益广泛的应用,尤其是在控制器参数优化方面具有重要的作用。

遗传算法包括参数编码及其解码,初始种群设定、适应度函数设计、遗传操作设计和控制参数设定等几个步骤。下面结合 PSS 的参数协调问题分别说明。

1.3.1 编码

传统的二进制编码,对于一些高维、高精度优化问题会由于个体串长过大占用大量的内存空间,严重影响了求解速度。本文采用十进制整数编码。由于控制器地点已通过参与因子确定,待优化的只有控制器参数。设 PSS 放大倍数和时间常数的范围为 $-50 < K_i < 50, 0 < \tau_i < 1$ 。根据这个范围,时间常数以三位十进制整数 $\{a_{1i} \ a_{2i} \ a_{3i}\}$ 表示;放大倍数以六位十进制整数 $\{b_{1i} \ b_{2i} \ b_{3i} \ b_{4i} \ b_{5i} \ b_{6i}\}$ 表示,相应的解码方式为

$$\begin{aligned} \tau_i &= 0.1a_{1i} + 0.01a_{2i} + 0.001a_{3i} \\ K_i &= 10b_{1i} + b_{2i} + 0.1b_{3i} + 0.01b_{4i} + \\ &\quad 0.001b_{5i} + 0.0001b_{6i} \end{aligned} \quad (5)$$

1.3.2 初始种群的产生

遗传算法是大范围内随机搜索,因此利用随机数产生初始种群。根据放大倍数和时间常数的取值范围,在 Matlab 环境中利用下列语句随机生成染色体中每一位基因:

$$x_i = \text{round}(l * \text{rand}(1, 1)) \quad (6)$$

式(6)产生的为整数,其范围是 $0 \leq x_i \leq l$ 。

1.3.3 适应度函数设计

适应度函数由目标函数转化而来,适应度值表明了个体对环境适应能力的强弱,遗传算法用来指导搜索方向的准则。本文根据电力系统对稳定性的要求,采用下面的适应度函数:

$$\text{fitness} = \begin{cases} C & \text{存在 } \text{Re}(\lambda_i) > 0 \\ C + J & \text{不存在 } \text{Re}(\lambda_i) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

C 是一个足够大的正数,保证适应度函数大于零。

1.3.4 遗传操作和控制参数的设定

a. 选择:采用最佳保留机制和轮盘赌相结合的方式。“轮盘赌”的选择方式简单,便于实现并且效果较好。同时,为了防止进化过程中得到的最优个体在以后的进化过程中丢失,以一定的比例在每一代中选出最优染色体不参与此次的遗传操作而直接进

入下一代。

b. 交叉:交叉是产生新个体的主要方法,决定遗传算法的全局搜索能力,本文采用单点交叉、自适应交叉概率^[8]为

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f_1 - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f_1 \geq f_{avg} \\ P_{c1} & f_1 < f_{avg} \end{cases} \quad (8)$$

式中 f_{max} 代表群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f_1 为要交叉的 2 个个体中较大的适应度值; $P_{c1}=0.9,P_{c2}=0.6$ 。

c. 变异:变异是产生新个体的辅助方法,决定遗传算法的局部搜索能力,本文采用单点变异、自适应变异率^[8]。变异操作的方式为:随机确定进行变异的个体、基因座以及变异的方向,以变异概率对基因值进行随机加 1 或减 1 的操作,若基因值已达到最大或最小,则只分别进行减 1 或加 1 的操作,即

$$b'_k = \begin{cases} b_k + 1 & \text{当 } b_k^{\min} < b_k < b_k^{\max} \text{ 且 } r < 0.5 \\ & \text{或 } b_k = b_k^{\min} \\ b_k - 1 & \text{当 } b_k^{\min} < b_k < b_k^{\max} \text{ 且 } r \geq 0.5 \\ & \text{或 } b_k = b_k^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中 b_k 和 b'_k 分别为基因变异前后的值;上标 max 和 min 分别代表基因的上下限值; r 用来控制变异方向。

变异概率如下:

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_2 - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f_2 \geq f_{avg} \\ P_{m1} & f_2 < f_{avg} \end{cases} \quad (10)$$

式中 f_{max} 代表群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f_2 为要变异个体的适应度值; $P_{m1}=0.1,P_{m2}=0.001$ 。

d. 控制参数:控制参数的选取对遗传算法寻优的准确性和效率影响较大,通常最大代数 and 种群规模越大,结果越接近最优解,但运行时间也越长。本文采用最大遗传代数 100,种群规模 100。

2 算例及其结果

以一四机两区域系统^[9]为例,电网结构见图 3,参数为标么值。图中标出了一种典型方式下的潮流。

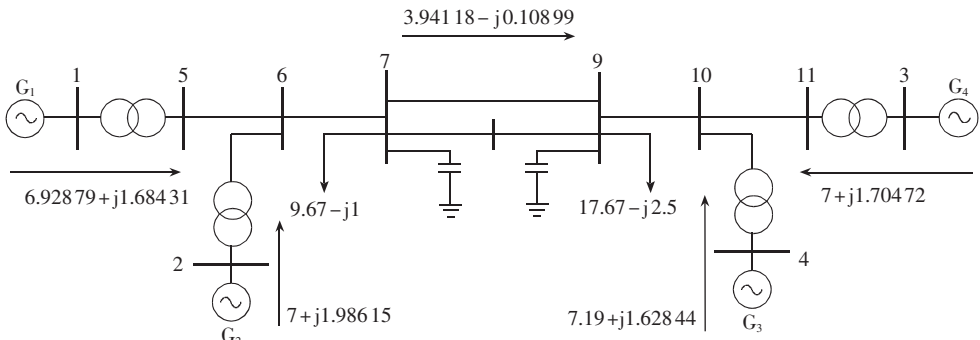


图 3 四机两区域系统

Fig.3 A two-area four-machine power system

根据参与因子的大小确定反馈本机转速信号的 PSS 装设于 2 号机和 4 号机上,反馈区域间相对功角差和转速差的 PSS 装设于 3 号机上。利用遗传算法优化控制器参数,优化前后的特征值比较见表 1。由表 1 可见加入控制器前,系统中存在 2 个不稳定的机电振荡模式,而加入控制器后,所有机电模式的阻尼都为正,并且有了充足的阻尼裕度。

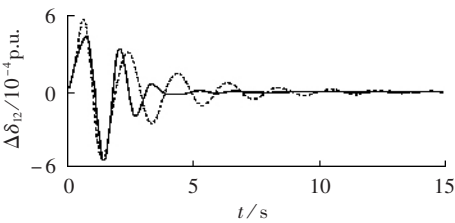
信号的比较结果。

表 1 加入控制器前后机电模式特征值比较

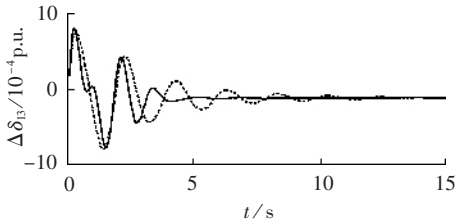
Tab.1 Comparison of electromechanical mode between systems with and without controller

不加控制器		加入控制器	
特征值	阻尼比	特征值	阻尼比
0.0288±j5.4410	-0.0053	-1.4170±j6.3565	0.2176
-0.0367±j5.9350	0.0062	-1.1549±j5.4130	0.2087
0.3497±j3.6335	-0.0958	-0.8326±j4.0405	0.2018

为了验证引入远方信号以及遗传算法的有效性,在 Matlab 6.5 环境中进行了仿真,仿真曲线见图 4、图 5。图 4 为应用本文遗传算法和传统方法^[10]的比较结果,图 5 为 3 号机引入本机信号和引入远方



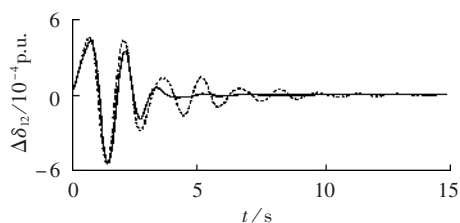
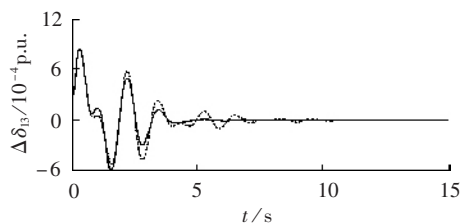
(a) G₁,G₂之间相对功角的冲激响应曲线



(b) G₁,G₃之间相对功角差冲激响应曲线

图 4 与传统方法比较结果图

Fig.4 Comparison between conventional method and genetic algorithm

(a) G_1, G_2 之间相对功角的冲激响应曲线(b) G_1, G_3 之间相对功角差冲激响应曲线

— 引入远方信号 只引入本机信号

图5 反馈远方信号与只反馈本地信号比较

Fig.5 Comparison between remote signal feedback and local signal feedback

3 结语

本文分析了在 PSS 中引入广域测量信号的必要性。针对一个四机两区域系统,根据参与因子的分析结果,在与地区模式强相关机组上装设以本机转速信号为输入的 PSS,在与区域模式强相关机组上装设以区域间相对功角差和相对转速差为输入的 PSS,并应用遗传算法对 PSS 参数进行优化。特征值分析和仿真结果表明,引入广域测量信号与只引入本地信号相比可以增强系统阻尼,且本文采用的遗传算法要优于传统设计 PSS 参数的方法,它能更好地抑制低频振荡。

参考文献:

- [1] 常乃超,兰洲,甘德强,等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术,2005,29(10):46-50. CHANG Nai-chao, LAN Zhou, GAN De-qiang, et al. A survey on applications of wide-area measurements system in power system analysis and control[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(10): 46-50.
- [2] ABOUL-ELA M E, SALLAM A A, MCCALLEY J D, et al.

Damping controller design for power system oscillations using global signals[J]. *IEEE Trans. on Power System*, 1996, 11(2):767-773.

- [3] 马燕峰,赵书强,魏清. 基于遗传算法的交直流电力系统稳定器和附加控制器的协调[J]. 电力自动化设备,2004, 24(5):75-79.

MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, WEI Qing. Coordination between power system stabilizer and additional controller based on genetic algorithms[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2004, 24(5):75-79.

- [4] KAMWA I, GERIN-LAJOIE L, TRUDEL G. Multi-loop power system stabilizers using wide-area synchronous phasor measurements [C] // *Proceedings of the 1998 American Control Conference*. Philadelphia, Pennsylvania: [s.n.], 1998:2863-2868.

- [5] 许树楷,谢小荣,辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术,2005,29(2):44-49.

XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(2):44-49.

- [6] KAMWA I, GRONDIN R, HEBERT Y. Wide-area measurements based stabilizing control of large power systems—a decentralized/hierarchical approach[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2001, 16(1):136-153.

- [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.

- [8] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

- [9] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

- [10] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

杨晓静(1980-),女,河北沧州人,硕士,研究方向为电力系统运行、分析与控制(E-mail: yangxiaojing0601@163.com);
赵书强(1964-),男,河北景县人,教授,博士,研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统谐波分析;
马燕峰(1978-),女,河北迁西人,助教,硕士,研究方向为电力系统运行、分析与控制。

Parameter optimization for power system stabilizer with wide area measurement signals

YANG Xiao-jing, ZHAO Shu-qiang, MA Yan-feng

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

Abstract: The conventional PSS (Power System Stabilizer) can not effectively damp inter-area mode due to only local information. PSSs with wide area measurement signals are installed to damp local modes and PSSs with local signals are installed to damp inter-area modes. The participation factors are applied to determine the locations of PSSs and genetic algorithm is used to coordinate the parameters. Communication delay is considered for the remote signal feedback of PSS. Example shows that the proposed scheme damps low frequency oscillation effectively.

Key words: power system; low frequency oscillation; wide area measurement system; power system stabilizer; genetic algorithm