

# 基于随机聚焦粒子群算法的多机系统 PSS 参数优化

李奇<sup>1</sup>, 陈维荣<sup>1</sup>, 段涛<sup>1</sup>, 刘述奎<sup>1</sup>, 刘元勋<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆鹅岭 77100 部队政治干部处, 重庆 404100)

**摘要:** 随机聚焦粒子群算法 (SFPSO) 是一种应用于连续空间的、具有较好的全局搜索能力和寻优速度的群体智能优化算法。通过采用 SFPSO 算法, 对多机系统的 PSS 参数进行优化。该方法是以最优控制原理为基础, 综合考虑 PSS 与励磁系统的性能, 将 PSS 参数优化协调转化为带有不等式约束的优化问题, 控制目标为系统输出按照最小误差跟踪给定值的能力。通过仿真测试以及不同算法优化结果的对比, 表明基于 SFPSO 算法优化的 PSS 在不同的干扰下都具有良好的性能, 能够抑制低频振荡, 并保持系统稳定, 同时证明了 SFPSO 算法的有效性和优越性。

**关键词:** 电力系统稳定器; 随机聚焦粒子群算法; 多机系统; 参数优化

## Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers based on stochastic focusing particle swarm optimization

LI Qi<sup>1</sup>, CHEN Wei-rong<sup>1</sup>, DUAN Tao<sup>1</sup>, LIU Shu-kui<sup>1</sup>, LIU Yuan-xun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Polity, 77100 Army of Eling, Chongqing 404100, China)

**Abstract:** Stochastic focusing particle swarm optimization (SFPSO) applied to continuous space is a swarm intelligence optimization algorithm with preferable ability of global search and search rate. SFPSO is proposed to optimize the multi-machine power system stabilizer (PSS). Based on optimal control principle, the performance of PSS and excitation system is considered into the method. The parameter optimization is converted to a problem of constraint inequality, and according to the least error with system output, the control object is considered as the ability of tracking reference value. The simulation results and the comparison results with various optimization algorithms demonstrate that PSS could obtain the favorable performance using SFPSO under different disturbance and could restrain the low frequency oscillation. Simultaneously, the validity and superiority of SFPSO is proved.

**Key words:** power system stabilizer; stochastic focusing particle swarm optimization; multi-machine power system; parameter optimization

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0013-06

## 0 引言

现代电力系统的主要特点之一是规模越来越大, 同时伴随着快速高放大倍数励磁系统的采用。研究和实践表明, 高增益和快速励磁系统可以有效地提高发电机电压调节特性和电力系统的暂态稳定水平, 但同时也可能使系统总的阻尼减小甚至出现负阻尼从而引起系统低频振荡, 在联系较弱的系统中表现尤为显著, 危及系统的安全运行。通过在发电机励磁系统中加装电力系统稳定器 PSS (Power System Stabilizer) 为系统提供正阻尼是抑制低频振荡的有效措施, 合理配置 PSS 的参数可以取得理想的系统动态性能, 提高系统的稳定性。

目前, 国内外学者在 PSS 参数优化协调方面做了一定的研究工作。多种优化算法如遗传算法、模拟退火算法、进化策略和粒子群算法已经对 PSS 的参数进行了优化<sup>[1~6]</sup>, 并且起到了一定的优化效果, 但是都存在可操作性差、收敛性差、容易陷入局部极值等缺点。

粒子群算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是美国 Kennedy 和 Eberhart 博士受鸟群觅食行为的启发, 于 1995 年提出的一种生物进化算法<sup>[7]</sup>。PSO 算法采用速度-位置搜索模型, 每个粒子代表解空间的一个候选解, 粒子在搜索空间以一定的速度飞行, 飞行速度根据飞行经验进行动态调整。每个潜在解与粒子运行速度相联系, 该速度不停地根据粒子经验以及与该粒子邻近的粒子经验来调整大小、方向,

总是希望粒子能朝着更好的方向发展。因此,在搜索过程中全局搜索能力与局部搜索能力的平衡关系对于算法的成功起着至关重要的作用。

随机聚焦粒子群算法 SFPSO (Stochastic Focusing Particle Swarm Optimization) 是在 PSO 算法的全局搜索与局部搜索平衡特性的基础上,改进得到的一种具有较好的全局搜索能力和寻优速度的群体智能优化算法。SFPSO 算法中,全部粒子个体处于各自的最佳位置,随机地向群体中到目前为止获得最好搜索效果个体的一个邻域点搜索。当搜索获得的效果好于粒子个体的极值时,则更新个体位置,并在下次搜索时保持该个体当前的速度继续向前搜索<sup>[8]</sup>。

本文在前述 PSS 优化研究工作的基础上,提出了一种基于 SFPSO 算法的 PSS 参数优化方法。在这种方法中,不同于以往只寻找机电振荡模式下阻尼比最小的 PSS 优化方法<sup>[1-6]</sup>,根据最优控制原理综合考虑 PSS 与励磁系统的性能,优化的控制目标设为系统输出按最小误差跟踪给定值的能力,将 PSS 参数优化协调转化为带有不等式约束的优化问题。用 SFPSO 算法对该问题求解,不易使问题的解收敛于局部最优解,并且可以提高寻优速度,从而能够对系统所装 PSS 的参数进行很好优化,同时证明了该算法的有效性和优越性。

## 1 PSS 参数优化问题数学描述

### 1.1 电力系统模型

电力系统的数学模型用非线性微分方程组表示如下:

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (1)$$

式中:  $X$  为状态变量向量;  $U$  为控制变量向量。

加装 PSS 后,系统在小扰动情况下,根据李雅普诺夫线性化方法,把描述系统动态特性的微分-代数方程组在平衡点(稳定运行点)处线性化,得到电力系统的状态方程为:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + BU \quad (2)$$

$$A = \frac{\partial f}{\partial X} \quad (3)$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial U} \quad (4)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为平衡点估计值;  $\Delta X$  为状态变量的偏差量;  $\Delta U$  控制变量的偏差量。

### 1.2 PSS 模型

本文 PSS 采用超前-滞后校正模型,将发电机的转速偏差  $\Delta \omega_p$  为输入信号,传递函数如下:

$$U_p = \frac{sK_p}{1+sT_{wp}} \cdot \frac{1+sT_{1p}}{1+sT_{2p}} \cdot \frac{1+sT_{3p}}{1+sT_{4p}} \Delta \omega_p \quad (5)$$

式中:  $U_p$  为第  $p$  台发电机的 PSS 输出信号;  $T_{wp}$  为隔直环节的时间常数;  $T_{1p}$ 、 $T_{2p}$ 、 $T_{3p}$ 、 $T_{4p}$  为超前-滞后环节的时间常数;  $K_p$  为 PSS 增益与隔直环节时间常数的乘积。

### 1.3 PSS 参数优化目标函数和约束条件

目前,大多数 PSS 优化问题仅仅是寻找机电振荡模式下阻尼比最小的参数,无法综合考虑 PSS 与励磁系统的性能。而根据最优控制原理,对有约束最优化问题借助于 Pontryagin 极小值原理<sup>[9-11]</sup>,控制目标可描述为系统输出按最小误差跟踪给定值的能力,这样就考虑了综合性能指标,实现抑制系统中功率、频率等量的振荡,使其保持稳态值。

从动态角度考虑,ITAE 准则在处理误差绝对值与时间乘积的积分时,兼顾了受扰动时系统在振荡过程中及趋于平稳时的输出误差<sup>[9,11]</sup>,故本文选择它作为 PSS 作用效果的目标函数,误差为各转子角速度与它们各自稳态值的相对误差绝对值之和。对于多目标最优化问题,选取目标函数如下:

$$f = \int_{t_0}^t [a_1 |\omega_1(t) - \omega_{s1}| + a_2 |\omega_2(t) - \omega_{s2}| + \dots + a_p |\omega_p(t) - \omega_{sp}|] \quad (6)$$

式中:  $\omega_p(t)$  为第  $p$  台发电机在  $t$  时刻的转子角速度;  $\omega_{sp}$  为第  $p$  台发电机转子角速度的稳态值;  $a_p$  为可加权因子。

考虑到 PSS 中各参数的限制, PSS 设计问题可以表述为如下带约束的优化问题:

$$\begin{cases} \min & f \\ \text{s.t.} & K_{p,\min} \leq K_p \leq K_{p,\max} \\ & T_{1p,\min} \leq T_{1p} \leq T_{1p,\max} \\ & T_{3p,\min} \leq T_{3p} \leq T_{3p,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: 参数  $K_p$  的典型取值范围是 [0.1, 1000],  $T_{1p}$  的典型取值范围是 [0.01, 1.0],  $T_{3p}$  的典型取值范围是 [0.01, 1.0],  $T_{wp}$ 、 $T_{2p}$ 、 $T_{4p}$  为给定值。

## 2 改进的粒子群优化算法

### 2.1 PSO 算法的基本原理

假设在  $M$  维搜索空间(解空间)里,有  $s$  个粒子组成的粒子群,其中第  $i$  个粒子位置可以表示成  $M$  维向量,  $\bar{x}_i(n) = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM}]$ ,  $j$  表示变量  $\bar{x}_i$  的第  $j$  维分量;粒子的飞行速度为  $\bar{v}_i(n) = [v_{i1}, v_{i2}, \dots,$

$v_{ij}, \dots, v_{iM}$ ]; 该粒子所经历的个体最佳位置可表示为  $\bar{p}_i(n)=[p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{iM}]$ ; 在整个粒子群中, 所有粒子经历过的最佳位置为  $\bar{g}_i(n)=[g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij}, \dots, g_{iM}]$ , 当第  $i$  个粒子从  $n-1$  代迭代到  $n$  代时, 可采用下式进行其速度和位置的更新<sup>[6]</sup>:

$$\bar{v}_i(n) = \omega \cdot \bar{v}_i(n-1) + \text{Rand} \cdot [\bar{p}_i(n-1) - x_i(n-1)] + \text{Rand} \cdot [\bar{g}_i(n-1) - x_i(n-1)] \quad (8)$$

$$\bar{x}_i(n) = \bar{v}_i(n) + \bar{x}_i(n-1) \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为惯性权值;  $\text{Rand}$  为在  $[0, 1]$  范围内变化的随机数;  $n$  为迭代次数; 粒子数  $i = 1, 2, \dots, s$ .

## 2.2 SFPSO 算法的基本原理

针对 PSO 算法搜索性能取决于对全局搜索和局部搜索能力的平衡这一特性, 本文在其基础上进行改进, 提出了一种具有较好的全局搜索能力和寻优速度的 SFPSO 算法。

在 SFPSO 算法中, 所有粒子个体立足于自身的最好位置 (个体极值), 随机向群体中到目前为止获得最好搜索效果个体 (全局极值) 的一个邻域点搜索。当搜索获得的效果好于粒子个体的极值时, 则更新个体的位置, 并且在下一步搜索时维持该个体当前的速度 (方向和步长) 继续向前搜索。

区别于 PSO 算法, SFPSO 算法并不同向种群中的全局极值和个体极值趋进, 而是在全局极值的一个邻域中进行搜索; SFPSO 算法也不会一直保持个体的速度, 除非上一步使用该速度已经找到了更优解; SFPSO 算法中个体始终保持自己搜索过程中的个体极值位置, 并以此为起点进行后续搜索。

假设待解决的优化问题为极小值问题, SFPSO 算法中粒子个体的位置按如下公式更新:

$$\bar{v}_i(n) = \begin{cases} \text{Rand} \cdot [R_n - \bar{x}_i(n-1)] & \text{if } \text{fun}(\bar{x}_i(n-1)) \geq \text{fun}(\bar{x}_i(n-2)) \\ \bar{v}_i(n-1) & \text{if } \text{fun}(\bar{x}_i(n-1)) < \text{fun}(\bar{x}_i(n-2)) \end{cases} \quad (10)$$

$$\bar{x}_i(n) = \bar{v}_i(n) + \bar{x}_i(n-1) \quad (11)$$

$$\bar{x}_i(n) = \bar{x}_i(n-1) \quad \text{if } \text{fun}(\bar{x}_i(n)) \geq \text{fun}(\bar{x}_i(n-1)) \quad (12)$$

式中:  $\text{fun}(\bar{x}_i(n))$  是粒子个体  $i$  在第  $n$  次迭代时的搜索效果 (目标函数值);  $R_n$  是  $\bar{g}_i(n)$  邻域空间  $R$  中随机选取的一个点, 邻域空间  $R$  的范围如下所示:

$$R \in \left[ \bar{g}_i(n) - \frac{\omega(\bar{g}_i(n) - \bar{x}_{\min})}{(\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min})^{1-\omega}}, \bar{g}_i(n) + \frac{\omega(\bar{x}_{\max} - \bar{g}_i(n))}{(\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min})^{1-\omega}} \right] \quad (13)$$

式中:  $\bar{x}_{\max}$  和  $\bar{x}_{\min}$  是搜索空间的边界; 当  $\omega$  从 1 逐渐减小为 0 时,  $R$  就从整个解空间收敛到点  $\bar{g}_i(n)$ 。

从公式 (10) 至 (12) 可以看出, 粒子个体在一个收缩的  $\bar{g}_i(n)$  邻域空间  $R$  中搜索。因此有必要选择一个适当的邻域空间  $R$  以避免搜索过程中的不

收敛或者收敛于一个局部最优值, 而  $R$  的选择受到  $\omega$  的控制。在 SFPSO 算法中选择了如下的  $\omega$ :

$$\omega = \left( \frac{G-t}{G} \right)^\delta \quad (14)$$

式中:  $G$  为最大迭代次数;  $\delta$  为可调速度因子。

为了进一步避免搜索过程陷入局部最优, 提高全局搜索能力, SFPSO 算法对种群提出了一种分组策略, 如下所示:

$$\mu = \lfloor \omega \cdot s + 1 \rfloor \quad (15)$$

式中:  $\lfloor \bullet \rfloor$  表示向下取整。随着迭代次数  $n$  的增加, 通过惯性权值  $\omega$  的作用, 将分组数  $\mu$  从种群数  $s$  逐渐减小为 1, 即最开始每个个体独立为一组, 互不联系地单独搜索解空间, 在搜索过程中, 逐渐结合在一起, 联合搜索, 最后会融合为一个分组。每组成员根据个体的编号顺序分配, 在不能平均分配的情况下, 多余的个体将被作为最后一组的成员。

由于使用了分组策略, 针对每一组, 设定其对应的  $\bar{g}_i(n)$  为组内有最好目标函数值的个体位置。这样能尽量避免所有个体向一个全局极值趋进而陷入局部最优。

SFPSO 算法流程如下:

- 1)  $t \leftarrow 0$ ;
- 2) 初始化: 在搜索空间均匀随机地产生  $s$  个初始位置,

$$\{\bar{x}_i(n) | \bar{x}_i(n) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}), i = 1, 2, \dots, s, n = 0\};$$

- 3) 评价: 计算每个粒子个体的位置(解)的目标函数值;
- 4) 分组策略: 进行分组并找到每个分组中的

$\bar{g}_i(n)$ ;

- 5) 位置更新: 根据式 (10)、(11)、(12), 更新每个粒子个体的位置;

- 6)  $t \leftarrow t + 1$ ;
- 7) 若不满足进化结束条件, 则转 3), 否则转 8);
- 8) 输出结果。

## 3 PSS 参数优化与动态仿真结果

### 3.1 PSS 参数优化结果

为了检验 SFPSO 算法的性能以及 PSS 参数优化对系统暂态稳定的作用, 本文使用 Matlab7.0 的电力系统仿真模块集 SimPowerSystems Blockset (SPB), 对基于 IEEE 421.5-2005 标准的 Kundur 四机两区系统<sup>[12]</sup>进行 PSS 参数优化和系统动态性

能仿真。

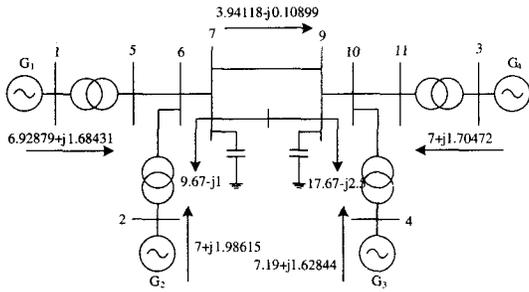


图 1 Kundur 四机两区电力系统结构图

Fig.1 A structure diagram of Kundur's four-machine two-area power system

Kundur 四机两区系统结构如图 1 所示，图中参数均为标么值，并标出了典型方式下的潮流<sup>[12]</sup>。发电机  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  采用五阶模型<sup>[13]</sup>，其额定容量均为 900 MVA，并且均配有自并励静止励磁系统<sup>[14]</sup>，系统模型具体参数见文献[12~14]。图 2 所示为该系统的仿真模块图。

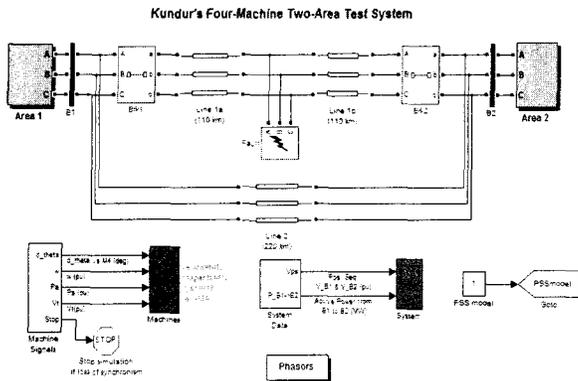


图 2 Kundur 四机两区电力系统仿真模块图

Fig.2 A simulation module diagram of Kundur's four-machine two-area power system

根据参与因子的选址方法<sup>[1,2,15]</sup>，将 PSS 装设在发电机  $G_2$  和  $G_4$  上，其中  $T_{wp}=20$ ， $T_{2p}=0.02$ ， $T_{4p}=0.02$  ( $p=2, 4$ )。通过采用种群大小为 100、进化代数为 100 的 SFPSO 算法对  $K_p$ 、 $T_{1p}$ 、 $T_{3p}$  三个参数进行优化，并且与在相同条件下的全面学习粒子群算法 (CLPSO)<sup>[16]</sup>以及自适应惯性权值粒子群算法 (PSO- $\omega$ )<sup>[17]</sup>的参数优化结果进行了比较。表 1 为三种优化算法的参数优化结果，表 2 为算法的结果比较。图 3 所示是在随机选取初始解的条件下，随着进化代数的增加，SFPSO 算法搜索到相对最优参数对应的 ITAE 变化曲线。

表 1 CLPSO、PSO- $\omega$ 、SFPSO 的参数优化结果  
Tab. 1 Parameter optimization result of CLPSO, PSO- $\omega$ , and SFPSO

机组 \ 算法	CLPSO	PSO- $\omega$	SFPSO	
$G_2$	$K_p$	540.186	392.172	860.254
	$T_{1p}$	0.931	0.037	0.412
	$T_{3p}$	0.948	0.034	0.218
$G_4$	$K_p$	760.135	250.94	792.187
	$T_{1p}$	0.774	0.027	0.254
	$T_{3p}$	0.259	0.019	0.211

表 2 CLPSO、PSO- $\omega$ 、SFPSO 的算法结果比较  
Tab. 2 Comparison of the result of CLPSO, PSO- $\omega$  and SFPSO

算法	种群	进化代数	ITAE	进化时间/s
CLPSO	100	100	0.115 2	6 390.765 6
PSO- $\omega$	100	100	0.095 8	3 236.843 7
SFPSO	100	100	0.031 5	2 588.031 2

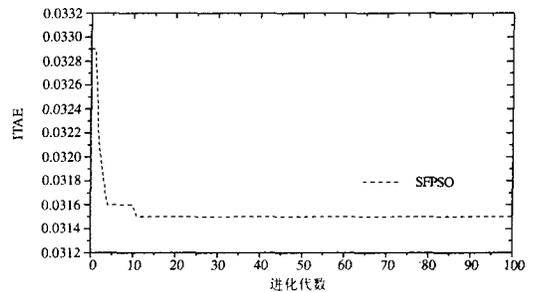


图 3 搜索过程中 ITAE 的变化趋势  
Fig. 3 Trend of ITAE during searching

### 3.2 动态仿真结果分析

为了评价基于 SFPSO 算法优化的 PSS 性能，对励磁系统参考电压加 5% 的扰动和系统发生三相短路故障的情况下，对配置采用 CLPSO、PSO- $\omega$ 、SFPSO 算法优化的 PSS 的 Kundur 四机两区系统进行动态仿真。

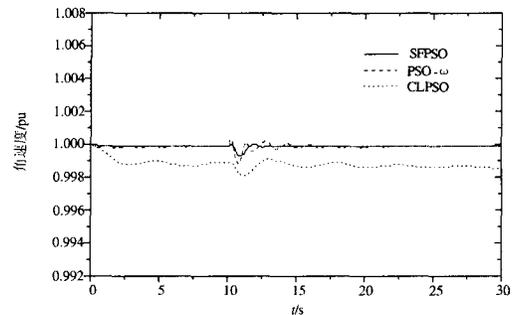


图 4 发电机  $G_2$  的转子角速度动态响应曲线 (加 5% 扰动)  
Fig.4 Dynamic response curve of rotor speed of generator  $G_2$  (adding disturbance of 5%)

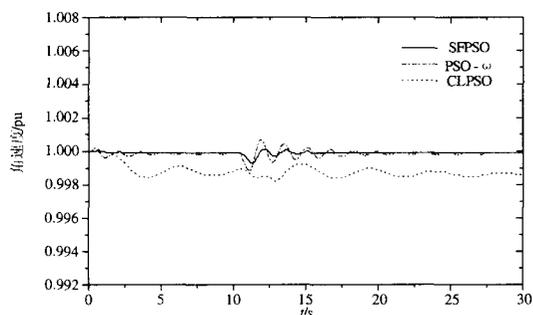


图5 发电机  $G_4$  的转子角速度动态响应曲线 (加 5% 扰动)  
Fig.5 Dynamic response curve of rotor speed of generator  $G_4$  (adding disturbance of 5%)

图 4~7 是测试励磁系统参考电压在 10 s 时发生 5% 的扰动并持续 0.5 s 的结果。这种干扰情况会使发电机机端电压产生变化, 从而影响系统的暂态稳定。图 4 和图 5 所示为机组  $G_2$ 、 $G_4$  的转子角速度动态响应曲线。从图中可以看到采用 SFPSO 算法优化的 PSS, 转子角速度摆动幅度比较小, 发电机  $G_2$  的转子角速度在 12.7 s 时达到稳定, 发电机  $G_4$  在 15.3 s 时达到稳定。与其比较, PSO- $\omega$  算法优化 PSS 的发电机  $G_2$ 、 $G_4$  分别在 23.3 s 和 27.3 s 才达到稳定; CLPSO 算法优化 PSS 的转子角速度在仿真时间 30 s 内均没有达到稳定, 而且这两种 PSS 的转子角速度摆动幅度都较大。

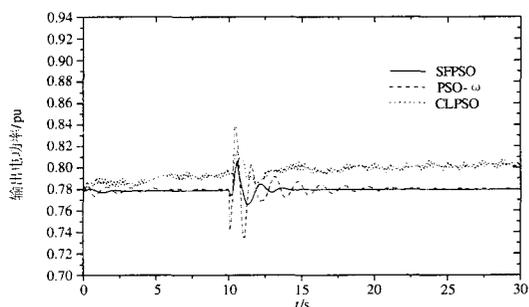


图6 发电机  $G_2$  的电磁功率动态响应曲线 (加 5% 扰动)  
Fig.6 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator  $G_2$  (adding disturbance of 5%)

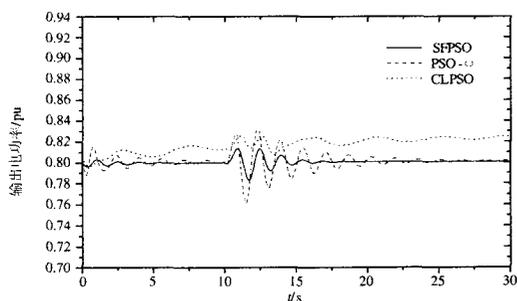


图7 发电机  $G_4$  的电磁功率动态响应曲线 (加 5% 扰动)  
Fig.7 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator  $G_4$  (adding disturbance of 5%)

图 6 和图 7 所示为机组  $G_2$ 、 $G_4$  的电磁功率动态响应曲线。图中可见采用 SFPSO 算法优化的 PSS, 电磁功率摆动幅度较小, 发电机  $G_2$  的电磁功率在 15.6 s 时达到稳定, 发电机  $G_4$  在 18.4 s 时达到稳定。与其比较, PSO- $\omega$  算法优化 PSS 和 CLPSO 算法优化 PSS 的电磁功率在仿真时间 30 s 内都没有达到稳定。

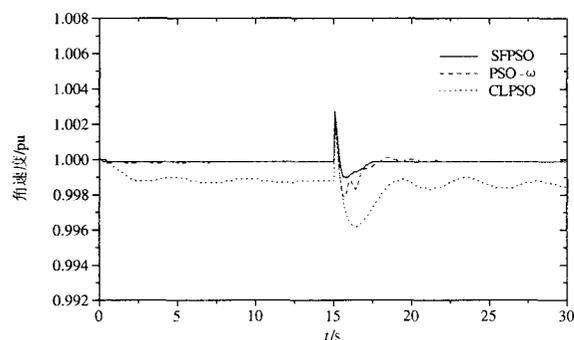


图8 发电机  $G_2$  的转子角速度动态响应曲线  
(三相短路故障)

Fig.8 Dynamic response curve of rotor speed of generator  $G_2$  (the fault of three phase short circuit)

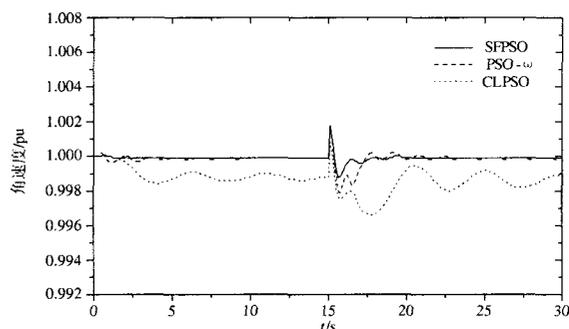


图9 发电机  $G_4$  的转子角速度动态响应曲线  
(三相短路故障)

Fig.9 Dynamic response curve of rotor speed of generator  $G_4$  (the fault of three phase short circuit)

图 8~11 是测试系统的 7-9 线路上在 15 s 时发生三相短路故障持续 0.1 s 后重合闸成功的结果。图 8 和图 9 所示为机组  $G_2$ 、 $G_4$  的转子角速度动态响应曲线。图中可见采用 SFPSO 算法优化的 PSS, 转子角速度摆动幅度较小, 发电机  $G_2$  的转子角速度在 17.5 s 时达到稳定,  $G_4$  在 19.7 s 时达到稳定。与其比较, PSO- $\omega$  算法优化 PSS 的发电机  $G_2$  在 21.8 s 时达到稳定,  $G_4$  在 30 s 内没有达到稳定; CLPSO 算法优化 PSS 的转子角速度在仿真时间 30 s 内均没有达到稳定。

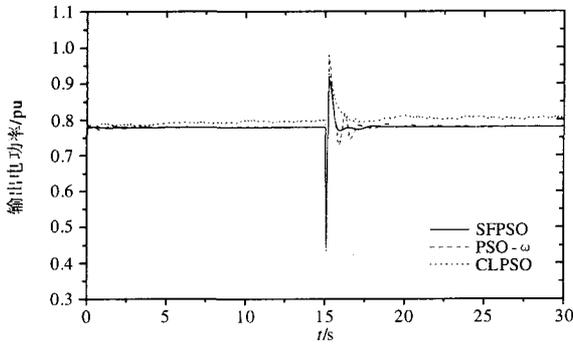


图 10 发电机 G<sub>2</sub> 的电磁功率动态响应曲线 (三相短路故障)

Fig.10 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator G<sub>2</sub> (the fault of three phase short circuit)

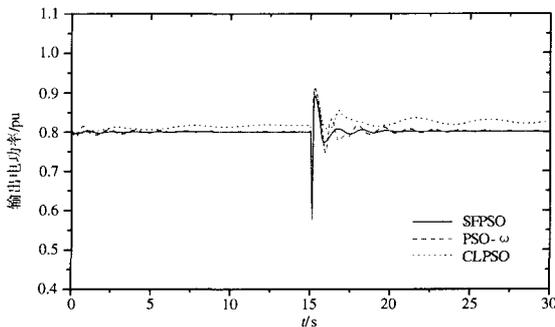


图 11 发电机 G<sub>4</sub> 的电磁功率动态响应曲线 (三相短路故障)

Fig.11 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator G<sub>4</sub> (the fault of three phase short circuit)

图 10 和图 11 所示为机组 G<sub>2</sub>、G<sub>4</sub> 的电磁功率动态响应曲线。由图中可见采用 SFPSO 算法优化的 PSS, 电磁功率摆动幅度较小, 发电机 G<sub>2</sub> 的电磁功率在 20.3 s 时达到稳定, G<sub>4</sub> 在 23.9 s 时达到稳定。与其比较, PSO- $\omega$  算法优化 PSS 和 CLPSO 算法优化 PSS 的电磁功率在仿真时间 30 s 内都没有达到稳定。

从以上增加励磁系统电压扰动和系统三相短路故障的仿真测试结果表明, 基于 SFPSO 算法优化的 PSS 可以减小转子角速度和电磁功率的摆动幅度, 使回落比较平滑, 有利于系统在受到扰动后迅速、可靠地回到稳定状态, 对维持系统稳定有重要作用。

### 4 结论

本文在 Matlab 环境下, 将 SFPSO 算法用于多机系统 PSS 的参数优化问题。SFPSO 算法是在 PSO 算法的全局搜索与局部搜索平衡特性的基础上, 改进得到的一种具有较好的全局搜索能力和寻优速度

的群体智能算法。不同于以往只寻找机电振荡模式下阻尼比最小的 PSS 优化方法, 本文根据最优控制原理综合考虑 PSS 与励磁系统的性能, 优化的控制目标设为系统输出按最小误差跟踪给定值的能力, 将 PSS 参数优化协调转化为带有不等式约束的优化问题。通过采用电力系统仿真模块集 SPB, 对 Kundur 四机两区系统进行 PSS 参数优化和系统动态性能仿真。仿真结果表明, 经 SFPSO 算法优化的 PSS 在不同的干扰下都具有良好的性能, 使系统的低频振荡现象得到了很好抑制, 并验证了 SFPSO 算法的有效性和优越性。

### 参考文献

- [1] Abdel-Magid Y L, Abido M A. Optimal Multi-objective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (3): 1125-1132.
- [2] Abdel-Magid Y L, Abido M A, Al-Baiyat S, et al. Simultaneous Stabilization of Multi-machine Power Systems Via Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1428-1439.
- [3] Abido M A. Robust Design of Multi-machine Power System Stabilizers Using Simulated Annealing[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2000, 15 (3): 297-304.
- [4] Zhang P, Coonick A. H. Coordinated Synthesis of PSS Parameters in Multi-machine Power Systems Using the Method of Inequalities Applied to Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 811-816.
- [5] 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.
- [6] NIU Zhen-yong, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang, et al. Parameter Optimization of Multi-machine Power System Stabilizers using Evolutionary Strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27(in Chinese).
- [7] 赵辉, 刘鲁源, 张更新. 基于微粒群优化算法的最优电力系统稳定器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 32-35.
- [8] ZHAO Hui, LIU Lu-yuan, ZHANG Geng-xin. Optimal Design of Power System Stabilizer using Particle Swarm Optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 32-35(in Chinese).
- [9] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Pptimization[A]. in: Proc of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks[C]. 1995.1942-1948.
- [10] 李奇, 陈维荣, 戴朝华, 等. 基于搜寻者优化算法的质子交换膜燃料电池模型优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 119-124.
- [11] LI Qi, CHEN Wei-rong, DAI Chao-hua, et al. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Model Optimization Based on Seeker Optimization Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 119-124 (in Chinese).

- [5] Boliaris P G, Prousalidis J M, Hatziaargyriou N D, et al. Simulation of Long Transmission Lines Energization for Black Start studies[A]. in: Electrotechnical Conference[C]. Antalya(Turkey): 1994.
- [6] Delfino B, Denegri G B, Invernizzi M, et al. Black-start And restoration of a Part of the Italian HV Network: Modeling and Simulation of a Field Test[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (3): 1371-1379.
- [7] Funakoshi T, Furukawa K. Transformer Overvoltage Problems And countermeasures at Black Start[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Toronto(Canada):2003.
- [8] Sakaguchi T, Matsumoto K. Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102 (2): 320-329.
- [9] 郁惟镛, 房鑫炎, 熊惠敏. 华东电网黑启动方案研究之一[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000,(2): 1-4. YU Wei-yong, FANG Xin-yan, XIONG Hui-min. The First Research of East-China Power System Black-Start Plan [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2000,(2): 1-4.
- [10] 郑良华, 田开禄, 陈西洲, 等. 孤网运行实践[J]. 吉林电力, 2008(2): 26-28. ZHENG Liang-hua, TIAN Kai-lu, CHEN Xi-zhou, et al. Operation Practice of Isolated Power Grid [J]. Jilin Electric Power, 2008(2): 26-28.
- [11] 丁磊, 潘贞存, 苏永智, 等. 并网分散电源的解列与孤岛运行[J]. 电力自动化设备, 2007,27(7): 25-29. DING Lei, PAN Zhen-cun, SU Yong-zhi, et al. Splitting and Islanding of Networked Dispersed Generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(7): 25-29.
- [12] 孙惟东, 韩天祥. 上海电网岛式运行电厂模式探讨[J]. 中国电力, 2004,24(5): 51-53. SUN Wei-dong, HAN Tian-xiang. Discussion on Isolated Islands Operation Mode in Shanghai Power Network [J]. Electric Power, 2004,24(5): 51-53.
- [13] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 冲击负荷实用建模新方法[J]. 电力系统自动化, 2006,30(20): 10-14. GU Dan-zhen, AI Qian, CHEN Chen, et al. A General Modeling Method for the Impact Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(20): 10-14.

收稿日期: 2008-08-12; 修回日期: 2008-11-06

作者简介:

陈石通(1984-), 男, 研究生, 从事电力系统黑启动以及继电保护装置方面研究; E-mail: movingcloud@sjtu.edu.cn

房鑫炎(1963-), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统继电保护及系统安全方面的研究;

胡子珩(1963-), 男, 博士, 长期从事电力系统运行与管理工作。

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [9] Dorf R C, Bishop R H. Modern Control Systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2005.
- [10] Bristow D A, Tharayil M, Alleyne A G. A Survey of Iterative Learning Control: a Learning-based Method for High-performance Tracking Control[J]. IEEE Trans on Control Systems, 2006, 26(3): 96-114.
- [11] 薛定宇, 陈阳泉. 控制数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. MATLAB Solutions to Mathematical Problems in Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [12] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [13] 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. NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [14] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003. WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] 徐光虎, 苏寅生, 孙衢, 等. 基于特征值分析法的 PSS 最佳安装地点的确定[J]. 继电器, 2004, 32(8): 1-4. XU Guang-hu, SU Yin-sheng, SUN Qu, et al. Identification of PSS Optimum Location Based on Eigenvalue Analysis Method[J]. Relay, 2004, 32(8): 1-4.
- [16] Liang J J, Qin A K. Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, et al. Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 67-82.
- [17] Shi Y, Eberhart R. Empirical Study of Particle Swarm Optimization[A]. in: Proc of the 1999 Congress on Evolutionary Computation[C]. 1999. 1945-1950.

收稿日期: 2008-08-08; 修回日期: 2008-10-29

作者简介:

李奇(1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为群体智能算法、电力系统稳定控制等; E-mail: liqi0800@gmail.com

陈维荣(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、智能监测技术等;

段涛(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化、进化算法等。