

基于粒子群优化算法的 PSS 参数优化

吴峰, 陈维荣, 李奇, 鲁晓帆

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 粒子群算法(PSO- ω)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。基于单机无穷大系统模型,通过采用 PSO- ω 算法对电力系统稳定器(PSS)进行参数优化,以抑制低频振荡。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(ITAE 准则)。用 Matlab 软件进行仿真,结果表明,利用该方法设计的 PSS,它的稳定性有了较大的提高。

关键词: 电力系统稳定器; 粒子群算法; 单机系统; 参数优化; ITAE 准则

Parameter optimization of power system stabilizer on particle swarm optimization algorithm

WU Feng, CHEN Wei-rong, LI Qi, LU Xiao-fan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Particle swarm optimization (PSO- ω) applied to continuous space is a swarm intelligence optimization algorithm with preferable ability of global search and search rate. Based on the single machine infinity system, PSO- ω is proposed to optimize the parameter of 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 consider as the ability of tracking reference value(the principle of ITAE). MATLAB simulation results show that the stability of the PSS with the method is enhanced.

Key words: power system stabilizer; particle swarm optimization; single machine with infinite bus; parameter optimization; ITAE

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0053-06

0 引言

在现代电力系统中,随着电网规模的不断扩大,机组单机容量的增加,以及快速励磁系统的投入,低频振荡问题已经成为影响互联电力系统稳定的重要原因之一。同时,低频振荡也是一个向远距离输电线路增加输电容量的严重瓶颈。低频振荡的发生是由于在电力系统中,发电机经输电线路并列运行时,在小扰动作用下,发电机转子之间会发生相对摇摆,这时电力系统如果缺少必要的阻尼就会失去动态稳定。由于电力系统的非线性特性,动态失稳表现为发电机转子之间的持续的振荡,同时输电线路功率也会发生相应的振荡,影响了功率的正常输送。由于这种持续振荡的频率很低,一般在 0.2~2.5 Hz 之间,故称为低频振荡^[1]。其振荡时产生的能量通过机电联系来传递,因此又称为机电振荡,表现为发电机电功率和功角的变化。低频振

荡严重时会导致系统解列或失去稳定。

为了抑制低频振荡,提高电力系统的动态稳定性,可以采用附加控制信号,通过励磁系统提供附加的正阻尼,以补偿原来的负阻尼,使得系统总的阻尼为正值。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、免疫算法、进化规则和粒子群算法已经对 PSS 的参数进行了优化^[2~6],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^[6]。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。

惯性权值自适应的粒子群算法 PSO- ω (Particle Swarm Optimization) 是在全局搜索与局部搜索平衡特性的基础上, 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。在标准 PSO 算法中, 惯性权值 ω 是平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力的关键参数。PSO- ω 算法中, 惯性权值 ω 采用了自适应的方式, 以达到更好的全局搜索能力。

本文在前述 PSS 优化研究工作的基础上, 提出了一种 PSO- ω 算法的 PSS 设计, 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^[2-6], 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 PSO- ω 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。再通过 Prony^[7,8] 特征值分析以及故障测试的仿真, 验证了所设计 PSS 的有效性和鲁棒性。

1 PSS 的设计

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:

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

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

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

式中: A 、 B 为平衡点估计值; ΔX 为状态变量的偏差量; ΔU 为控制变量的偏差量。

1.2 PSS 模型

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

$$U = K \cdot \frac{sT_w}{1+sT_w} \cdot \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \cdot \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \Delta\omega \quad (5)$$

式中: U 为发电机的 PSS 输出信号; T_w 为隔直环节的时间常数; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为超前-滞后环节的时间常数; K 为 PSS 增益。

1.3 PSS 优化的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^[11,12], 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^[11,12], 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。对于单目标最优化问题, 选取目标函数如下:

$$f = \int_0^T t \cdot [a_1 |\omega_1(t) - \omega_{s1}|] dt \quad (6)$$

式中: $\omega_1(t)$ 为发电机在 t 时刻的转子角速度; ω_{s1} 为发电机转子角速度的稳态值; a_1 为可调权重因子。

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:

$$\begin{cases} \min & f \\ \text{s.t.} & K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \\ & T_{1,\min} \leq T_1 \leq T_{1,\max} \\ & T_{3,\min} \leq T_3 \leq T_{3,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: K 、 T_1 、 T_3 为待优化的参数。参数 K 的典型取值范围是 [0.1, 1000], T_1 的典型取值范围是 [0.01, 1.0], T_3 的典型取值范围是 [0.01, 1.0], T_w 、 T_2 、 T_4 为给定值。

2 粒子群优化算法

2.1 PSO 算法的基本原理

PSO 算法是从生物种群行为特性中得到启发并用于求解优化问题。在 PSO 中, 每个优化问题的潜在解都可以想象成 D 维搜索空间上的一个点, 我们称之为“粒子” (Particle)。粒子在搜索空间中以一定的速度飞行, 这个速度根据它本身的飞行经验和同伴的飞行经验来动态调整, 所有的粒子都有一个被目标函数决定的适应值, 并且知道自己到目前为止发现的最好位置 (记为 P_{best}) 和当前的位置。这个可以看作是粒子自己的飞行经验, 除此之外, 每个粒

子还知道到目前为止整个群体中所有粒子发现的最好位置(记为Pbest),这个可以看作是粒子的同伴的经验。每个粒子使用下列信息改变自己的当前位置:
1) 当前位置; 2) 当前速度; 3) 当前位置与自己最好位置之间的距离; 4) 当前位置与群体最好位置之间的距离。优化搜索正是在由这样一群随机初始化形成的粒子而组成的一个种群中,以迭代的方式进行的。

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^[6]:

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

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

式中: ω 为惯性权值; 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 PSO- ω 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 PSO- ω 算法。

在 PSO- ω 中,惯性权重采用自适应的方式:

$$\omega = \omega_{\max} - \text{iter} \cdot (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \text{maxit}$$

Maxit:最大迭代数; iter: 迭代数;

其算法流程如下:

- 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) 比较粒子的适应值和自身最优粒子 pbest 的适应值,如果当前值比 pbest 更优,则以当前粒子替换 pbest;
- 5) 比较粒子适应值与种群最优值,如果当前值比 gbest 更优,则置 gbest 为当前粒子的矩阵下标和适

应值;

- 6) 位置更新: 按式(8)和式(9)更新粒子的位移方向和步长,产生新种群 $X(t+1)$;
- 7) $t \leftarrow t+1$;
- 8) 若不满足进化结束条件,则转 3), 否则转 8);
- 9) 输出结果。

3 PSS 参数优化与仿真结果

3.1 PSS 参数优化结果

为了检验 PSO- ω 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),对标准的单机无穷大系统进行 PSS 参数优化和系统性能仿真。

单机无穷大系统仿真模型如图 1 所示,图中参数均为标么值,其额定容量均为 200 MVA,并且配有自并励静止励磁系统。其中 $T_w=5, T_2=0.05, T_4=0.05$ ^[7]。通过采用种群大小为 100、进化代数数为 100 的 PSO- ω 算法对 K_p, T_1, T_3 三个参数进行优化,且与在相同条件下的全面学习粒子群算法 (CLPSO)^[6] 参数优化结果进行了比较。表 1 为两种优化算法的参数优化结果。图 2 所示是在随机选取初始解的条件下,随着进化代数的增加,PSO- ω 算法搜索到相对最优参数对应的 ITAE 变化曲线。

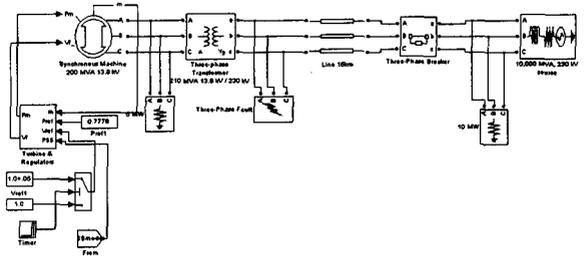


图 1 单机无穷大电力系统仿真模型

Fig.1 A simulation module diagram of the single machine infinite bus power system

表 1 CLPSO、PSO- ω 的参数优化结果

Tab. 1 Parameter optimization result of CLSPO and PSO- ω

参数	CLPSO	PSO- ω
K	3.921 3	29.430 9
T_1	0.025 6	0.076 1
T_3	0.614 6	0.341 0

表 2 为单机系统特征值,单机系统在无 PSS 时阻尼比为 0.062 3,系统是处于临界稳定的状态,安

装 PSS 后系统稳定, 但是机电振荡模式下的阻尼比较小, 为 0.15。用 PSO- ω 算法优化后的 PSS 的阻尼比提高到 0.409 0, 较大程度地提高了系统的阻尼。

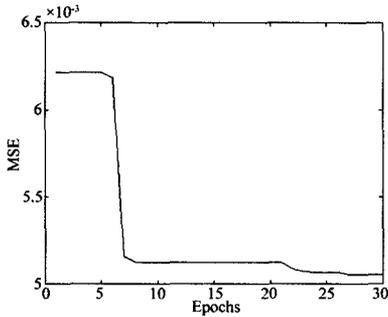


图 2 搜索过程中 ITAE 的变化趋势
Fig. 2 Trend of ITAE during searching

表 2 单机系统的特征值

Tab.2 The characteristic value of the single machine system

系统未装 PSS		未优化的 PSS		优化后的 PSS	
特征值	-0.672 2± 10.767 0i	特征值	-1.005± 6.607i	特征值	-1.673 3± 3.733 7i
阻尼比	0.062 3	阻尼比	0.15	阻尼比	0.409 0
频率	1.713 6	频率	1.052	频率	0.594 2

3.2 动态仿真结果分析

为了评价基于 PSO- ω 算法优化的 PSS 性能, 对系统励磁系统参考电压加 5% 的扰动、系统发生三相短路、三相断路故障的情况下, 对配置了采用 CLPSO、PSO- ω 算法优化的 PSS 系统进行动态仿真。

3.2.1 小扰动情况下 PSS 有效性分析

机端电压参考值加 5% 方波电压阶跃, 对比不同算法得出的 PSS 对提高静态稳定性的作用。

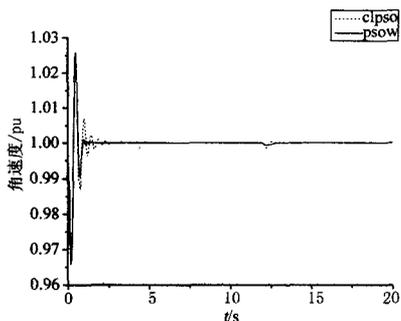


图 3 发电机的转子角速度动态响应曲线 (加 5% 扰动)
Fig.3 Dynamic response curve of rotor speed of generator (adding disturbance of 5%)

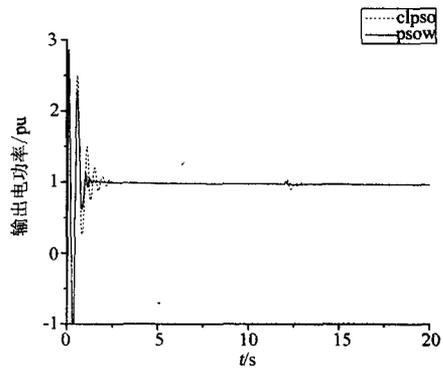


图 4 发电机电磁功率动态响应曲线 (加 5% 扰动)

Fig.4 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator (adding disturbance of 5%)

图 3 是测试励磁系统参考电压在 12 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。从图中可以看到采用 PSO- ω 算法优化的 PSS, 转子角速度摆动幅度比较小, 发电机的转子角速度在 12.7 s 时达到稳定。与其比较, CLPSO 算法优化的 PSS 的发电机在 14.5 s 才达到稳定。

图 4 所示为机组的电磁功率动态响应曲线。图中可见采用 PSO- ω 算法优化的 PSS, 电磁功率摆动幅度较小, 发电机的电磁功率在 12.5 s 时达到稳定。与其比较, CLPSO 算法优化的 PSS 的电磁功率在 14.6 s 才达到稳定。

3.2.2 大扰动情况下 PSS 有效性分析

对于 PSS 的暂态性能, 通过发电机出口 $t=12$ s 发生三相短路和 $t=1$ s 发生三相断路故障的情况下进行仿真。

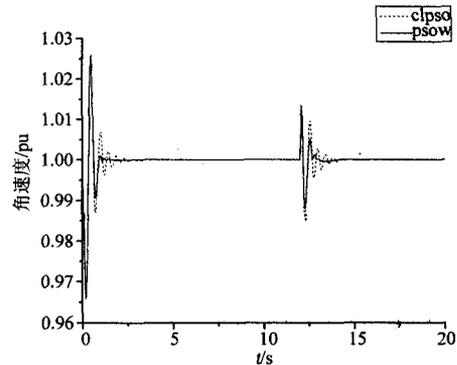


图 5 发电机转子角速度动态响应曲线(三相短路故障)
Fig.5 Dynamic response curve of rotor speed of generator (the fault of three phase short circuit)

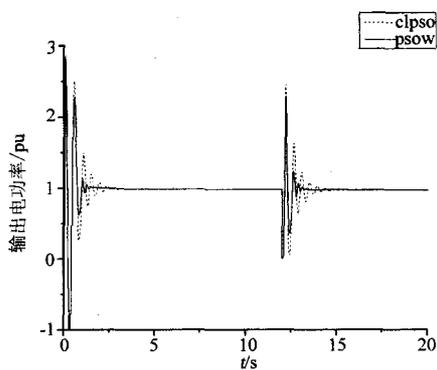


图 6 发电机电磁功率动态响应曲线 (三相短路故障)

Fig.6 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator (the fault of three phase short circuit)

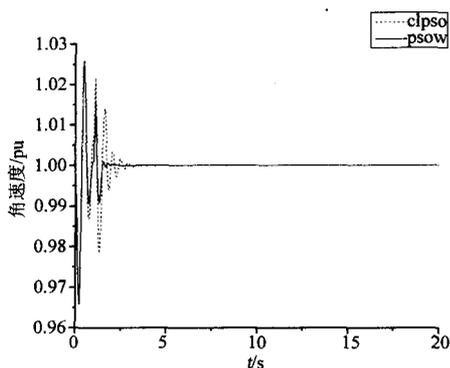


图 7 发电机转子角速度动态响应曲线 (三相断路故障)

Fig.7 Dynamic response curve of rotor speed of generator (the fault of three phase break circuit)

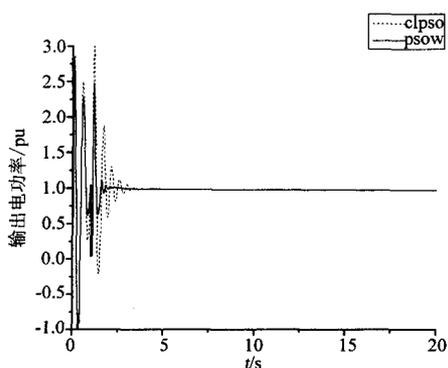


图 8 发电机电磁功率动态响应曲线 (三相断路故障)

Fig.8 Dynamic response curve of electromagnetism power of generator (the fault of three phase break circuit)

图 5、6 为三相短路故障持续 0.1 s 后重合闸成功后转子角速度和电磁功率变化的结果。图 7、8 为三相断路故障持续 0.1 s 后转子角速度和电磁功

率变化的结果。从图中可见采用 PSO- ω 算法优化的 PSS, 转子角速度和电磁功率摆动幅度较小, 发电机转子角速度、电磁功率达到稳定的时间均比 CLPSO 算法优化的要快。所以 PSS 能够很快地平息低频振荡, 提高了转子的暂态特性。

4 结论

本文在 Matlab 环境下, 将 PSO- ω 算法用于单机无穷大系统 PSS 的参数优化问题。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, 单机无穷大系统进行 PSS 参数优化和系统动态性能仿真。仿真结果表明, 经 PSO- ω 算法优化的 PSS 在不同的干扰下都具有良好的性能, 采用 Prony 分析法提出的特征值也验证了系统阻尼得到了提升, 从而使系统的低频振荡现象得到了很好抑制。对 PSO- ω 算法采用惯性权值 ω 自适应的方式, 达到了全局搜索与局部搜索平衡的特性, 是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。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘扬名. 电力系统稳定器 (PSS) 参数优化整定的研究
(硕士学位论文)[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
LIU Yang-ming. Study on the Optimal Algorithm of
Parameters of Power System Stabilizer, Thesis[D].
Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [4] 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 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.
- [5] 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.
 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).

[6] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[A]. In: Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks[C].1995: 1942-1948.

[7] Liang J J, Qin A K, Suganthan P N, et al. Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 67-82.

[8] 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(8): 32-35.
 LU Jing-jing, 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(8): 32-35.

[9] Prony 分析在电力系统低频振荡研究中的应用(硕士学位论文)[D].北京: 华北电力大学,2001.
 XU Dong-jie. The Application of Prony Analysis for Power System Low Frequency Oscillation Research, Thesis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.

[10] 方思力,朱方. 电力系统稳定器的原理及应用[M].北京: 中国电力出版社,1996.

[11] 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 Control Systems, 2006, 26(3): 96-114.

[12] 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.

[13] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

[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] 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: 2008-06-27; 修回日期: 2008-07-03

作者简介:

吴峰(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制, 进化算法等; E-mail:wufeng.winnie@hotmail.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;

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。

(上接第 47 页 continued from page 47)

[8] 张志平, 刘正平. 在 LabVIEW 中调用 MATLAB 的一种方法[J]. 计算机与现代化, 2004, (5): 94-95.
 ZHANG Zhi-ping, LIU Zheng-ping. A Method of Calling MATLAB in LabVIEW[J]. Computer and Modernization, 2004, (5): 94-95.

[9] 周丽霞. LabVIEW 在 BP 神经网络设备故障诊断系统中的应用[J]. 机床与液压, 2007, 35(4): 215-218.
 ZHOU Li-xia. Application of LabVIEW in BP Nerve Network Fault Diagnosis of Equipments[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(4): 215-218.

[10] 田瑞利, 张忠夫. 基于神经网络的虚拟电流预报仪的设计[J]. 微计算机信息, 2006, 22(9-1): 178-180.
 TIAN Rui-li, ZHANG Zhong-fu. The Design of Virtual Current Prediction Based on Neural Network[J]. 2006, 22(9-1): 178-180.

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-07-19

作者简介:

杜太行(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电器检测与试验、计算机应用、工业自动化方面的研究;

贾兴建(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算机智能理论与控制。E-mail: jiaxingjian@gmail.com