

基于混合粒子群优化算法的 PSS 参数优化

祁万春, 房鑫炎

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 将一种新的进化算法—粒子群优化算法 (PSO) 应用到电力系统稳定器 (PSS) 参数优化当中, 文中使用引入交叉操作的混合粒子群优化算法 (HPSO), 可以获得更好的全局搜索能力和收敛速度。先以低频振荡范围内 (0.1~2 Hz) PSS 产生的附加阻尼转矩 T_c 与 尽可能同相位为目标优化 PSS 超前 - 滞后环节参数; 再以小扰动时发电机功率和角速度振荡最小为目标整定 PSS 放大倍数。优化结果表明, HPSO 算法可以有效地解决 PSS 参数优化问题。

关键词: 混合粒子群优化; 交叉操作; 电力系统稳定器 (PSS); 参数优化

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)13-0021-04

0 引言

电力系统稳定器能否有效抑制低频振荡的关键, 是如何合理配置或选定电力系统稳定器的参数。目前 PSS 参数整定计算广泛使用的是相位补偿及临界增益法^[1], 传统上使用该方法设定超前 - 滞后环节的参数时, 以中心频率时 PSS 产生的附加阻尼转矩 T_c 与 同相位为原则, 依靠经验使较宽的频段上 T_c 与 相位相近, 无法保证在整个频段上 T_c 与 相位尽可能地接近, 而临界增益法确定的 PSS 增益也不能保证是 PSS 起到最佳阻尼的增益。

PSS 的参数优化是一个有约束条件的非线性、多参数、存在多个局部极小点的优化问题, 这类问题难以使用传统的优化方法解决。近年来, 随着启发式算法例如遗传算法 (GA)、禁忌搜索、模拟退火算法、蚁群算法等的发展, 为解决这类优化问题提供了新的途径。

在本文中使用了—种新型的进化算法—粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 进行 PSS 的参数寻优。粒子群优化算法是美国的 Kennedy J 和 Eberhart R. 于 1995 年受鸟群觅食行为的启发提出^[2], 与 GA 算法类似, PSO 算法也是一种基于迭代的随机搜索算法, 但它不是用遗传算子来更新染色体的基因, 而是类似梯度下降算法使各染色体向适应度函数值最高的方向群游, 粒子群优算法的优点是收敛速度快, 算法实现简单, 但基本 PSO 算法有易于收敛于局部最优点的缺点。本文将使用引入 GA 算法中的交叉操作的混合 PSO 算法, 实践证明这种混合 PSO 算法具有更快的收敛速度, 更好

的全局搜索能力。

本文中将以配置输入信号为 P_c 的电力系统稳定器并采用 IEEE AC2 无刷励磁系统的发电机为例, 基于单机 - 无穷大系统模型对发电机电力系统稳定器进行参数优化。

1 励磁系统参数优化问题的数学模型

本文中发电机数学模型使用经典的三阶模型, 电力系统稳定器数学模型如图 1 所示, 励磁系统模型使用 IEEE AC2 无刷励磁系统模型。

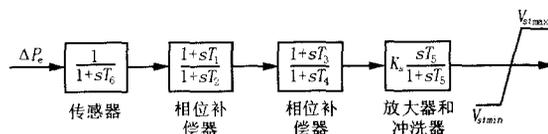


图 1 PSS 数学模型

Fig 1 Mathematic model of PSS

PSS 应该既能够尽可能高效地阻尼小扰动引起的振荡, 又能在整个频段上都有效地发挥其阻尼低频振荡的作用, 因此在 PSS 参数优化时必须兼顾这两方面的要求。PSS 能否在整个频段上都能有效阻尼低频振荡取决于 PSS 的频率响应特性, 也就是取决于超前 - 滞后环节的参数 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ; 而在 PSS 频率响应特性一定时, PSS 的增益是否合适选取对其阻尼作用影响很大。因此首先优化 PSS 的超前 - 滞后环节的参数; 再在已优化的超前 - 滞后环节参数下整定 PSS 的增益就可以较好地兼顾上述两方面的要求。

本文中分两阶段对 PSS 参数进行优化: 首先优化电力系统稳定器的超前 - 滞后环节的参数 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ; 再在已优化的超前 - 滞后环节的参数下

整定电力系统稳定器的增益 K_s 。

在优化电力系统稳定器的超前-滞后环节的参数 T_1, T_2, T_3, T_4 时以在整个低频振荡的频段上 (0.1 ~ 2 Hz), PSS产生的附加电磁转矩 T_e 与 相位最大限度接近为优化目标, 优化目标函数为:

$$\min J = \sum_{i=1}^n |T_e(f_i)| = \sum_{i=1}^n |P_e(f_i) - \text{PSS}(f_i) - \text{Ex}(f_i)| \quad (1)$$

式中: f_1, f_2, \dots, f_n 是等比数列, 代表低频振荡频段上的 n 个频率点, $f_1 = 0.1 \text{ Hz}, f_n = 2.0 \text{ Hz}$, 它们是一个等比数列。 $\text{PSS}(f_i)$ 、 $\text{Ex}(f_i)$ 、 $P_e(f_i)$ 、 $T_e(f_i)$ 分别表示在 $f=f_i$ 时电力系统稳定器滞后角、励磁系统滞后角、 P_e 相对 的超前角以及 T_e 相对于的超前角, 当 n 足够大时以 J 最小为优化目标就足以使在整个频段上 T_e 与 相位尽可能接近, 根据文献 [3], $T_e(f_i)$ 应小于 10° 大于 -45° ; 因此约束条件为 $T_e(f_i) \in (-45^\circ, 10^\circ)$ 。

在整定好的超前-滞后环节的参数 T_1, T_2, T_3, T_4 下, 以小扰动时发电机 和 P_e 振荡最小为优化目标整定 PSS增益 K_s , 目标函数如下:

$$\min J = \int_0^T (K_1 |P_e - P_{e0}| + K_2) dt \quad (2)$$

式中: P_e 为发电机电磁功率增量; P_{e0} 为扰动后进入稳态时发电机电磁功率增量; 为发电机电角速度增量; T 为计算时间。

2 粒子群优化算法

2.1 基本粒子群优化算法

美国的 Kennedy J 和 Eberhart R. 于 1995 年受鸟群觅食行为的启发提出粒子群算法 (PSO), PSO 算法中采用速度-位置搜索模型, PSO 算法随机初始化一群粒子, 粒子在一个 n 维空间中搜索, 其中的每个粒子所处的位置 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$ 都表示问题的一个解, 解的优劣程度, 由评价函数决定, 每个粒子都有速度 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$, 表示粒子在搜索空间中下一次迭代时的位移。每次迭代, 粒子通过动态跟踪两个极值来更新其速度和位置。一个是粒子从初始到当前迭代次数搜索产生的最优解: 个体极值 $pbest = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$; 另一个是粒子种群目前的最优解: 全局极值粒子 $gbest = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, 目前广泛使用的引入收敛因子的 PSO 算法根据以下公式来更新其速度和位置 [4]:

$$\begin{aligned} V_{ij} &= K[V_{ij} + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{ij} - X_{ij}) + \\ &\quad c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g_j - X_{ij})] \\ K &= \frac{2}{|2 - \sqrt{2 - 4}|} \\ &= c_1 + c_2 \\ X_{ij} &= X_{ij} + V_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $i = (1, 2, 3, \dots, m)$, $j = (1, 2, 3, \dots, n)$, m 为粒子数, n 为解的维数。

其中 K 为收敛因子, c_1, c_2 为惯性常数, 通常取 $c_1 = c_2 = 2.05$ 则 $K = 0.729$ 。 $\text{rand}()$ 为均匀分布在 (0, 1) 区间上的随机数, 粒子速度的最大限额为 $V_{\max} = (V_{\max1}, V_{\max2}, \dots, V_{\maxn})$, V_{\max} 通常取每维变化范围。基本 PSO 算法实现简单, 收敛速度快, 但是它的缺点是较易陷入局部最优点, 搜索精度不高, 因此研究者们对其作了各种各样的改进。

2.2 混合粒子群优化算法 (HPSO)

Lovbjerg, Rasmussen 和 Krink 于 2000 年提出将遗传算法中的交叉操作也引入 PSO 的 HPSO 模型 [5]。交叉型 PSO 在粒子群进行速度和位置的更新后, 以一定的交叉概率从所有粒子中随机选择待交叉的粒子, 然后两两随机组合进行交叉操作产生后代粒子, 取代双亲粒子。后代粒子的位置和速度矢量如下所示:

$$\begin{aligned} Child_1(X_j) &= p_j \cdot parent_1(X_j) + (1.0 - p_j) \cdot parent_2(X_j) \\ Child_2(X_j) &= p_j \cdot parent_2(X_j) + (1.0 - p_j) \cdot parent_1(X_j) \\ Child_1(V) &= \frac{parent_1(V) + parent_2(V)}{|parent_1(V) + parent_2(V)|} |parent_1(V)| \\ Child_2(V) &= \frac{parent_1(V) + parent_2(V)}{|parent_1(V) + parent_2(V)|} |parent_2(V)| \end{aligned} \quad (4)$$

交叉操作使后代粒子继承了双亲粒子的优点, 在理论上加强了对粒子间区域的搜索能力。例如两个双亲粒子均处于不同的局部最优区域, 那么两者交叉产生的后代粒子往往能够摆脱局部最优, 而获得改进的搜索结果。实验证明, 引入交叉操作的 HPSO 算法对于多峰函数, 不仅加快了收敛速度, 而且找到了更好的解。

PSS 的参数优化是一个有约束条件的非线性、多参数、存在多个局部极小点的优化问题, 这类问题难以使用传统的优化方法解决。近年来, 以遗传算法、粒子群优化算法为代表的启发式算法为解决这类优化问题提供了新的途径。但是近年来的研究表明遗传算法、基本 PSO 算法在解决复杂的非线性多

极值问题时易于陷于局部最优点,而引入交叉操作的 HPSO算法在求解该类优化问题时能以更快的收敛速度找到更好的解,因此本文选定该算法来求解 PSS参数优化问题。

3 基于混合粒子群优化算法的 PSS参数优化

本文以 PSS能在低频振荡的整个频段上(0.1~2 Hz)尽可能更有效地阻尼电力系统低频振荡为优化目标,使用引入交叉操作的 HPSO 算法求解 PSS参数优化问题,具体步骤如下:

1) 初始化:输入励磁系统参数和发电机参数,输入 PSS的已确定参数,输入待优化参数的上、下限值,设置粒子群体规模 $m = 50$,微粒的维数设为 4,加速因子 $c_1 = c_2 = 2.05$,收敛因子 $K = 0.729$,随机生成粒子群中所有粒子的位置及粒子速度,设置微粒的初始个体最优解 $pbest$ 为初始位置,全局最优适应值 $gbest$ 为 0,迭代次数 $iter$ 设为 0,最大迭代次数设为 50, V_{max} 设为每维的变化范围,交叉概率 p_{cross} 设为 0.2。

2) 更新每个粒子的适应度值:用每个粒子的当前位置对应的一组 T_1, T_2, T_3, T_4 值,计算 $f = f_1, f_2, \dots, f_n$ 时电力系统稳定器滞后角、励磁系统滞后角、 P_e 相对 P_{e0} 的超前角,利用式 (1) 求出目标函数值 J ,将该粒子的适应值更新为 $1/J$;如果存在某个 $T_e(f_i)$ 越限将其适应值减去一个惩罚值。

3) 比较每个粒子的适应值和当前个体最优解 $pbest$ 适应值,若对于某个粒子而言其适应值大于 $pbest$ 适应值则将当前位置作为该粒子个体最优解 $pbest$;将 $gbest$ 设为所有粒子 $pbest$ 中适应值最大的 $pbest$ 。

4) 用式 (3) 更新每个粒子的位置 X_i ,速度 V_i ,如果 X_i, V_i 的某维越上限或下限,将其设定为该维上限或下限值。

5) 按交叉概率从粒子群中选出待交叉粒子,两两随机组合进行交叉操作产生后代粒子,取代双亲粒子,后代粒子按式 (4) 生成新粒子的初始速度和位置,其 $pbest$ 设为初始位置。

6) 如果 $iter < 50, iter = iter + 1$,转至步骤 2)。

7) 将 T_1, T_2, T_3, T_4 设为当前 $Xbest$ 各维的值,将微粒的维数设为 1,以式 (2) 为目标函数确定每个粒子的适应度值,重复步骤 2)至步骤 6) 整定 PSS 的增益 K_s 。

8) 输出参数优化结果。

4 算例

发电机参数: $S_N = 352.5 \text{ MVA}, U_N = 10.5 \text{ kV}, x_d = 0.95, x_q = 0.56, x_d' = 0.22; \cos \phi_N = 0.85, T_{d0} = 6.8, M = 8.56, D = 5$; PSS参数: $T_5 = 5.0 \text{ s}, T_6 = 0.02 \text{ s}$

使用混合粒子群优化算法对该发电机 PSS进行参数优化,由于 $P_e - P_{e0}$ 与 $\Delta\omega$ 幅值上相差约 40 倍(两者均为标么值),为兼顾阻尼功率振荡和角速度振荡,式 (2) 中权重系数 $K_1 = 1, K_2 = 40$,优化结果如表 1 所示。

表 1 PSS参数优化结果

Tab 1 Result of parameters optimization of PSS

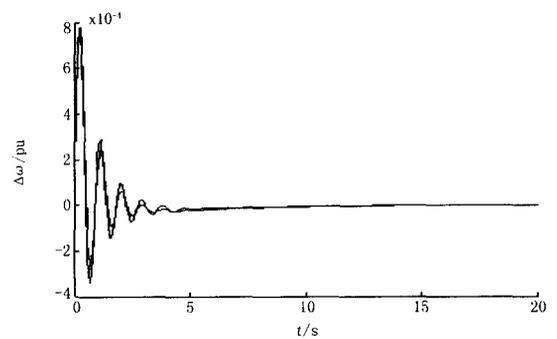
待优化参数	K_s	T_1	T_2	T_3	T_4
最大值	50	4	4	4	4
最小值	0.001	0.05	0.05	0.05	0.05
优化值	4.41	0.4463	4	0.0966	0.05

在优化后的超前-滞后环节参数下,在 0.1~2 Hz 的频段上 T_e 相对于 $\Delta\omega$ 的超前角见表 2。

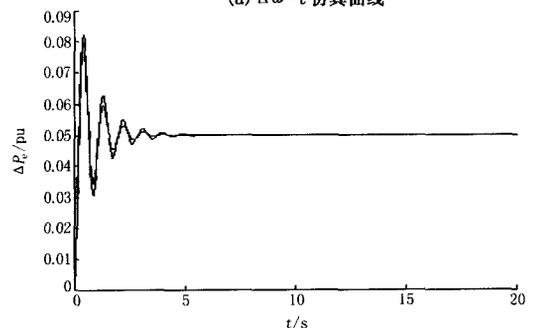
表 2 相位补偿环节频率响应特性

Tab 2 Phase frequency response of PSS

频率/Hz	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9
超前角/(°)	-0.026	-2.94	-2.7119	-1.3113	-0.3575
频率/Hz	1.2	1.5	1.8	2.0	
超前角/(°)	-0.1777	-1.4628	-3.0247	-4.7931	



(a) $\Delta\omega-t$ 仿真曲线



(b) ΔP_e-t 仿真曲线

图 2 发电机 $\Delta\omega-t, P_e-t$ 仿真曲线

Fig 2 Simulation curves of $\Delta\omega-t, P_e-t$

可见该组优化参数可以保证在整个低频振荡的频段上, T_e 与 δ 尽可能接近同相位。

当 PSS增益分别按传统方法和混合粒子群优化算法整定时,在小扰动时发电机 δ - t 、 P_e - t 仿真曲线见图 2。

图 2 中幅值较大的曲线为使用传统方法整定 PSS增益时的仿真曲线,幅值较小的曲线为使用混合粒子群优化算法整定 PSS增益时的仿真曲线。由图 2 可见使用混合粒子群优化算法整定 PSS增益可以更好地阻尼小扰动时发电机的角速度和电磁功率的振荡。

5 结论

1) 本文对 PSS参数优化进行了研究,提出以整个低频振荡频段上 T_e 与 δ 相位最大限度接近为优化目标,使用混合粒子群优化算法来优化 PSS超前-滞后环节的参数;以小扰动时发电机角速度和电磁功率振荡最小为优化目标,使用混合粒子群优化算法来整定 PSS的增益。仿真计算的结果表明使用上述目标函数并以混合粒子群优化算法整定 PSS参数相对于传统方法可以更好地在整个频段内阻尼电力系统低频振荡。

2) 粒子群优化算法具有算法实现简单,收敛速度快等优点,可以有效地解决高维、非线性、多峰值复杂优化问题,是一种新兴的有潜力的进化算法。本文使用引入交叉操作的混合 PSO算法,相对于基本 PSO算法具有更快的收敛速度和全局搜索能力,可以更加有效地获得 PSS参数优化问题全局最优解。PSO在实际应用中被证明是有效的,但目前其

理论和数学基础的研究还远远不够,算法还有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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): 50-54
FANG Si-li, TAN You-xin, HUANG Wen-ling. Power System Stabilizer Parameter Calculation and Method of Debugging[J]. Electric Power, 2000, 33(6): 50-54
- [2] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. Proc IEEE Int Conf on Neural Networks Perth: 1995. 1942-1948
- [3] 徐刚. 电力系统稳定器现场试验研究[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(2): 15-16
XU Gang. Field-test Research of Power System Stabilizer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, 22(2): 15-16
- [4] Clerc M. The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization[A]. Proc of the Congress on Evolutionary Computation Washington DC: 1999. 1951-1957.
- [5] Lovbjerg M, Rasmussen T K, Krink T. Hybrid Particle Swarm Optimiser with Breeding and Subpopulations[A]. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco(USA): 2001.

收稿日期: 2004-10-14; 修回日期: 2004-11-04

作者简介:

祁万春(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为励磁控制系统和电力系统稳定; E-mail: monster@sjtu.edu.cn
房鑫炎(1963-),男,副教授,研究方向为人工智能技术在电力系统中的应用。

Parameters optimization of power system stabilizer using hybrid particle swarm optimization algorithm

QI Wan-chun, FANG Xin-yan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A new proposed evolutionary computation called Particle Swarm Optimization (PSO) is applied to obtain optimal parameters of power system stabilizer(PSS). In this paper, a hybrid PSO algorithm with breeding is used, and this revised version is proved to be more probable to find a global optimal solution and to achieve faster convergence. First, the objective function to minimize the angular phase difference between additional damping torque (T_e) resulting from PSS and additional electric angular speed ($\dot{\delta}$) in the range of low-frequency oscillations (0.1 ~ 2Hz) is applied to obtain optimal parameters of lead-lag component of PSS, and then the objective function to minimize the oscillation of electric power and electric angular speed resulting from small disturbances is employed to set the gain of PSS. The proposed methodology has been implemented on a test power system and is proved to be efficient to solve the problem of parameters optimization of PSS in the end.

Key words: Hybrid Particle Swarm Optimization (HPSO); breeding; power system stabilizer; parameters optimization