

基于粒子群优化算法的电力系统稳定器设计

荣雅君, 贾艳, 刘琳, 李志强

(燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 基于单机无穷大系统模型, 用粒子群优化算法(PSO)对发电机电力系统稳定器(PSS)进行参数优化, 来抑制低频振荡。介绍了基本的粒子群优化算法的原理, 并用改进的带约束的粒子群优化算法优化PSS的参数, 将PSS的整个设计过程转化为一组参数进行寻优的过程, 提高了多参数寻优的效率。用Matlab仿真软件进行仿真, 仿真结果表明, 利用该方法设计的PSS, 它的小信号稳定性有了较大的提高。

关键词: 电力系统稳定器; 粒子群优化算法; 单机无穷大; 参数寻优; 仿真

Design of power system stabilizer on particle swarm optimization

RONG Ya-jun, JIA Yan, LIU Lin, LI Zhi-qiang

(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Based on the single plane infinity system model, this paper uses particle swarm optimization (PSO) on generator power system stabilizer (PSS) for parameter optimization to curb low frequency vibration. This paper introduces the basic PSO algorithm principle. And with improved constrained PSO to optimize PSS the parameter, it transfers the process of design of PSS to the process of optimization for a set of parameters, the efficiency of optimization for multiparameter is promoted. MATLAB simulation results show that the small-signal stability of the PSS with the method is enhanced.

Key words: power system stabilizer (PSS); Particle Swarm Optimization (PSO); single machine with infinite bus; parameter optimization; simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)04-0023-04

0 引言

电力系统发展初期, 系统的结构相对简单松散, 其静态稳定问题通常表现为发电机与系统之间的非周期失步。随着电力系统的不断扩大, 出现了大型电力系统的互联, 系统联系因此变得越来越紧密, 整个电力系统也变得越来越复杂。系统的静态稳定问题由此常表现为发电机组之间的功率动态振荡, 特别是在互联系统的联络线上, 这种振荡的表现更为突出。由于这种振荡的频率较低, 一般在0.2~2.5 Hz范围内, 因此通常称之为低频振荡。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, 是大型电力系统互联引起的最重要的影响系统稳定的问题之一。

抑制低频振荡的有效方法就是在励磁系统中采用电力系统稳定器PSS(Power System Stabilizer)。

PSS抽取与频率有关的信号, 处理后产生的附加信号引入到励磁系统中, 以增加正阻尼转矩, 克服原励磁调节器对系统稳定产生的有害影响, 改变系统的暂态特性^[1]。

PSS作为一种附加的励磁控制装置对电力系统稳定性的改善具有重要作用。但由于它是在系统某典型运行点将电力系统模型线性化而设计的, 当运行点发生变化时, PSS对振荡的抑制作用会有所减弱, 必须仔细选择其参数才能使其具有较好的适应性^[2]。

近年来, 基于种群的进化计算方法, 如遗传算法、进化规划、进化策略以及遗传规划, 正越来越广泛地被人们用来解决许多优化问题。和最速下降法等常规方法不同, 这种基于种群的方法不容易陷入局部极小点。因而, 现在许多优化问题都采用这种方法来求解, 尤其是对非线性、多峰值问题。粒子群优化算法PSO (Particle Swarm Optimization) 是美国的Kennedy J和Eberhart R于1995年受鸟群觅食

行为的启发而提出的一种新的进化算法^[3]。目前 PSO 算法已经被成功的应用于电力系统、交通、水利等领域。

PSO 算法的优点是收敛速度快, 算法实现简单。本文基于单机无穷大系统, 利用 PSO 算法对 PSS 的参数进行寻优设计, 并通过特征值分析以及故障测试、参数变化的仿真研究, 验证了所设计 PSS 的有效性和鲁棒性。

1 PSS 的设计

1.1 电力系统稳定器结构

本文中使用的 PSS 传递函数如下:

$$V = K \frac{sT_{\omega} (1+sT_1)(1+sT_3)}{1+sT_{\omega} (1+sT_2)(1+sT_4)} \Delta\omega \quad (1)$$

式中: V 为发电机的 PSS 输出信号; T_{ω} 为时滞时间常数; $\Delta\omega$ 为发电机转速与同步转速之间的转速差; T_2 和 T_4 为与被控对象相关的时间常数; PSS 增益 K 和时间常数 T_1 、 T_3 为待优化的参数。图 1 为电力系统稳定器结构框图。

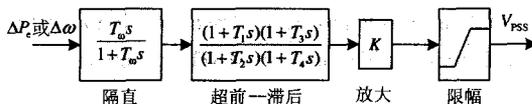


图 1 电力系统稳定器框图

Fig.1 PSS square frame diagram

1.2 目标函数

为了增加系统的阻尼, 本文引入如下的目标函数来设计 PSS:

$$J = \max\{R_c(\lambda_i)\} \quad (2)$$

式中, λ_i 为与机电模式相关的所有特征值。

在寻优过程中, 应使特征值不断向 S 平面的左半平面移动, 以提高阻尼。根据参数的边界特性, PSS 的设计转化为如下的优化问题:

$$\min J \quad (3)$$

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \quad (4)$$

$$T_{1\min} \leq T_1 \leq T_{1\max} \quad (5)$$

$$T_{3\min} \leq T_3 \leq T_{3\max} \quad (6)$$

这里取 K 的取值范围为 $[0.01, 50]$; T_1 、 T_3 的典型取值范围是 $[0.06, 1.0]$ 。

由于 λ_i 为与机电模式相关的所有特征值, 所以必须从系统的所有振荡模式中识别出机电振荡模式, 本文利用参与因子 (Participation factor) 来识别。参与因子度量了状态变量与模式之间的相关程度, 第 i 个模式与所有状态变量的参与因子组成了参与向量, 如果参与向量中模值最大的分量与发电机

的转速有关, 认为此模式为机电振荡模式。

该目标函数的参数优化问题可以描述为函数的极大极小值问题, 属于一类非光滑问题。

2 粒子群优化算法

PSO 算法是一种现代的启发式随机算法, 具有编程简单、收敛速度快、鲁棒性强等特点, 因此得到广泛的关注^[4]。

2.1 粒子群优化算法的原理

PSO 算法起源于对简单社会的模拟, 最初设想是模拟鸟群觅食的过程, 并利用和改进了生物学家的生物群体模型, 以使微粒能够飞向解空间并在最优解处降落, 后来发现 PSO 算法是一种很好的优化工具。PSO 算法与其他进化算法相类似, 也是将寻优的参数组合成群体, 通过对环境的适应度来将群体中的个体向好的区域移动。与其他进化算法不同, PSO 算法在描述个体时, 将其看成是 D 维寻优搜索空间的一个没有体积的随机微粒 (点), 结合微粒的历史最佳位置和群体历史最佳位置信息, 通过迭代找到最优解, 以一定的速度向目标值逼近。第 i 个微粒可以表示成 D 维向量, 微粒位置表示成 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, 微粒的速度表示成 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$, 这个微粒经历的最佳位置 (对应于最好的适应度) 表示为 $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$, 也称为 $Pbest$ 。群体所有微粒经历的最好位置的索引号用 g 表示, 记为 P_g , 也称为 $gbest$ 。微粒通过跟踪这两个“极值”来更新自己。第 i 个微粒从 n 代进化到 $n+1$ 代, 通过式 (7)、式 (8)

$$v_{id}^{n+1} = wv_{id}^n + c_1r_1^n(p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2r_2^n(p_{gd}^n - x_{id}^n) \quad (7)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (8)$$

进行更新。式中 $i = 1, 2, \dots, m$ 。 m 为微粒个数, w 表示惯性权重 (inertia weight), 它使微粒保持运动惯性, 使其具有扩展搜索空间的趋势, 有助于新区域的搜索。 c_1 、 c_2 均为正实数, 称为加速度常数 (acceleration constants), 表示将每个微粒推向 $Pbest$ 和 $gbest$ 的统计加速度的权重。 r_1^n 、 r_2^n 为在区间 $[0, 1]$ 变化的随机数。

2.2 优化问题中 PSO 算法实现过程

基本 PSO 算法需要用户确定的参数不多, 操作简单, 使用比较方便, 但其容易陷入局部最优, 搜索精度不高。针对带约束的优化问题, 本文通过竞争选择, 来解决这一问题。

本文中的 PSO 算法优化的步骤简单描述如下:

(1) 设置相关初始参数如种群规模 $N=40$, 惯性权

重 $w=0.7$, 加速度常数 $c_1=1.5$ 、 $c_2=1.5$, 搜索空间的维数 $D=2$, 优化参数 K 的范围为 $[0.01, 50]$; T_1 的范围为 $[0.06, 1.0]$ 。初始化群体中的微粒, 包括微粒的初始位置和初始速度, 为给定范围内的随机值。

(2) 评价各微粒的适应度函数值 $fitness$ 。

(3) 根据基本粒子群迭代公式(7)、(8)进行一次进化迭代产生中间子代, 判断中间代与原父代的优劣(进化选择): 若都可行, 选择适应度小的进入下一代; 若两个都不可行, 选择违背约束小的进入下一代; 若一个可行, 另一个不可行, 则无条件选择可行解。

(4) 更新个体和全局最优位置, 根据公式(7)、(8)进化迭代产生中间子代, 判断中间代与原父代的优劣(进化选择)。

(5) 迭代中止条件选为最大迭代数, 这里取最大迭代数为50, 如果达到结束条件, 则返回当前最佳微粒的结果, 算法结束; 否则返回(3), 继续下一循环。

3 实例

为了验证利用PSO算法来设计PSS的有效性, 本文基于单机无穷大系统进行参数优化, 具体参数见文献[5]。其中, T_2 、 T_ω 分别设定为0.033、1.4 s, 需优化的参数为 K 、 T_1 。群体规模为40, 最大的迭代次数为50, 维数为2。最终的优化结果为: $K=47.507$, $T_1=0.277$ s。在Matlab的Simulink下建立的仿真模型如图2:

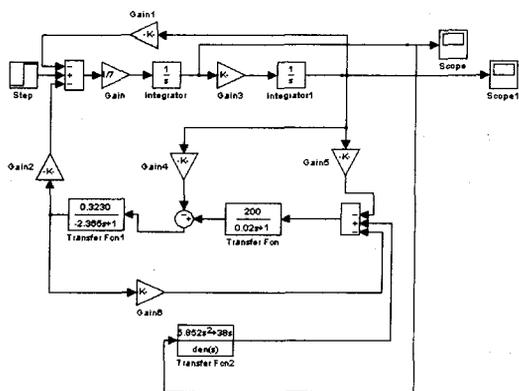


图2 仿真模型

Fig.2 Simulation model

文献[5]所给的PSS传递函数如下:

$$V = 9.5 \left[\frac{1.4s}{1+1.4s} \right] \left[\frac{1+0.154s}{1+0.033s} \right] \Delta\omega \quad (9)$$

3.1 鲁棒性分析

为了评价基于本文PSO算法设计的PSS的鲁棒

性, 本文采用特征值分析法。单机系统在无PSS和装有PSS情形下的特征值和阻尼比在表1中列出。通过表1可以看出, 文献[5]的单机系统在无PSS时阻尼比为-0.07, 因为阻尼比为负所以系统是不稳定的系统, 安装PSS后系统稳定, 但机电振荡模式下的阻尼比较小, 为0.15, 本文所设计的PSS的阻尼比增大为0.46, 较大程度地提高了系统的阻尼。

表1 单机系统的特征值

Tab.1 The characteristic value of the single machine system

无PSS		文献[5]的PSS		本文设计的PSS	
特征值	阻尼比	特征值	阻尼比	特征值	阻尼比
+ 0.504 ± j 7.23	-0.07	-1.005 ± j6.607	0.15	-1.4835 ± j2.8416	0.46
-20.202, -31.230		-19.797 ± j12.822	0.84	-16.0760 ± j39.1614	0.38
		-0.739, -39.097		-0.8572, -45.4640	

3.2 小干扰情况下的有效性分析

机械功率在0.5 s由0 pu 跃变为1.0 pu, 发电机转速偏差 $\Delta\omega$ 变化曲线如图3所示。从图中可以看出本文设计的PSS均能较快地平息低频振荡。

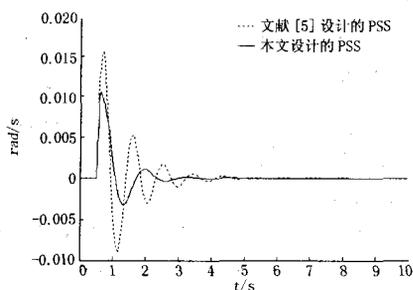


图3 小扰动下的 $\Delta\omega$ 变化曲线

Fig.3 The small move of $\Delta\omega$ variety curve

3.3 大干扰情况下的有效性分析

对于所设计PSS的暂态性能, 通过发电机出口的 $t=0.5$ s时的三相短路故障进行仿真。故障持续时间为0.1 s。由图4的仿真图可见, 所设计的PSS能够很快地平息低频振荡, 提高了转子的暂态特性。

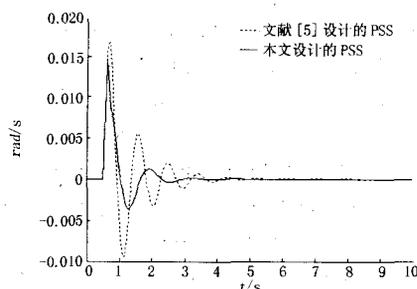


图4 三相短路时 $\Delta\omega$ 变化曲线

Fig.4 Three mutually short-circuit $\Delta\omega$ variety curves

4 结语

使用PSS使系统机电暂态模型的特征值由复平面的右半平面移到左半平面,提高了系统的鲁棒性。本文对PSS用PSO算法对其参数进行优化,当系统发生小扰动或三相短路故障时,用本文方法设计的PSS能够有效的抑制系统的低频振荡。

由于PSO算法提出的时间不长,算法缺乏深刻的、具有普遍意义的理论分析。其数学基础相对薄弱,且存在许多不完善和未涉及到的问题。以后的研究中我们应该利用有效的数学工具对算法的收敛性,收敛速度的估计,计算的复杂性,鲁棒性,以及预防陷入局部最优和参数设置影响等进行分析。目前,对PSO算法的研究相对其它比较成熟的优化算法应用范围较小,但随着进一步的深入研究,PSO算法将会应用到越来越多的领域中。

参考文献

- [1] 朱方,方思立. 电力系统稳定器的原理及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
ZHU Fang, FANG Si-li. The Principles and Applications of Power System Stability[M]. Beijing:China Electric Power Press, 1996.
- [2] 蔡超豪,王奇. 基于 H_{∞} 控制理论的电力系统稳定器[J]. 电网技术,2000,24(10):11-14.
CAI Chao-hao,WANG Qi. A Power System Stabilizer Based on H_{∞} Control Theory[J]. Power System Technology,2000,24(10):11-14.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. In: Proc IEEE Int Conf on Neural Networks[C]. Perth: 1995.1942-1948.
- [4] Eberhart R C, Shi Y H. Particle Swarm Optimization: Development, Applications and Resources [A]. In: Proceedings of Congress on Evolutionary Computation[C]. Seoul Korea: 2001. 81-86.
- [5] Kundar P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- 收稿日期:2007-06-11; 修回日期:2007-08-07
作者简介:
荣雅君(1975-),女,教授,研究领域为电力系统暂态稳定、电力系统继电保护;
贾艳(1982-),女,硕士在读,研究领域为智能算法。
E-mail:xibeifengse@163.com
-
- (上接第22页 continued from page 22)
- [4] 王克文,谢志棠,史述红,等. 基于概率特征根分析的电力系统稳定器参数设计[J]. 电力系统自动化,2001,25(11):20-23.
Wang K W, Tse C T, Shi Shuhong, et al. Power System Stabilizer (PSS) Parameter Design Based on Probabilistic Eigenvalue Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(11): 20-23.
- [5] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking Account of the Variation of Load Power[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46: 221-227.
- [6] 宗秀红,张尧,武志刚. 电压稳定的概率特征根分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):61-65.
ZONG Xiu-hong, ZHANG Yao, WU Zhi-gang. Probabilistic Eigenvalue Analysis for Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 61-65.
- [7] 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 for Dynamic Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [8] 谢志棠,宗秀红,钟志勇,等. 计及FACTS装置的概率特征根分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):13-17.
Tse C T, ZONG Xiu-hong, CHUNG C Y, et al. Probabilistic Eigenvalue Analysis Including FACTS Devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 13-17.
- [9] 刘明波,程劲晖,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化,1999,23(16):27-30.
LIU Ming-bo, CHENG Jin-hui, CHENG Ying. Dynamic Voltage Stability Analysis of Parallel AC/DC Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 27-30.
- [10] Chung C Y, Wang K W, Cheng C K, et al. Machine and Load Modeling in Large Scale Power Industries[A]. In: Proc of Dynamic Modeling Control Applications for Industry Workshop[C]. IEEE Industry Applications Society. 1998: 7-15.
- 收稿日期:2007-08-19; 修回日期:2007-11-13
作者简介:
宗秀红(1978-),女,博士,从事电力系统稳定控制与继电保护的研究与工作; E-mail:xhzhong2006@163.com
张尧(1948-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统分析及电压稳定的研究工作;
董泰福(1976-),男,硕士研究生,主要进行电力系统故障诊断、电力市场等研究。