

基于 NSGA - II 算法的 PSS 多目标优化设计

张利¹, 康积涛¹, 刘芽², 刘伟波¹

(1. 西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031; 2. 鄂尔多斯市东胜区大规模
储能技术研究所暨中国科学院工程热物理研究所东胜分所, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 电力系统稳定器(PSS)能够很好地抑制电力系统低频振荡,其参数的整定尤为重要。一般处理方法是将系统状态矩阵特征值实部和阻尼比分别加权转换成单目标问题,进而用优化算法对PSS控制器参数进行优化,而权重的选取对参数影响极大。以特征值实部和阻尼比作为两个目标,用NSGA-II多目标进化算法优化处理,最后与传统的遗传算法相比较。仿真结果表明,采用NSGA-II算法设计的PSS控制器,可以有效地阻尼电力系统低频振荡。

关键词: 低频振荡; PSS; 特征值; 阻尼比; NSGA-II算法

Abstract: Power system stabilizer (PSS) can inhibit the low-frequency oscillation well and the selection of its parameters is particularly important. Generally, both the real part and damping ratio of the eigenvalue of the system state matrix are weighted and then it is transformed into a single objective problem to design the controller parameters of PSS using optimization algorithm, but the parameters are influenced greatly by the selection of the weight. The real part and damping ratio of the eigenvalue are considered as two objectives to optimize the parameters using NSGA-II multi-objective evolutionary algorithm. Comparing with the traditional methods, the simulation results show that the PSS controller designed by NSGA-II algorithm can damp the low-frequency oscillation of power system effectively.

Key words: low-frequency oscillation; power system stabilizer (PSS); eigenvalue; damping ratio; NSGA-II algorithm

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0055-04

0 引言

工程经验表明,大型电力系统区域互联在带来优越性的同时,随之也会产生很多问题。低频振荡便是其中颇为常见而危害也较大的一种^[1]。适当地调整电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)一直是一个研究热点。经过多年的发展,神经网络、模糊控制等现代控制技术已被采用来设计PSS控制器。目前PSS控制器优化设计方法中大多是每次设计仅考虑一个指标,然而考察控制系统的性能指标有很多种,控制器设计的目标是使这多项目标达到一个最佳的折衷^[2]。传统优化算法大多是将多目标问题加权转化为单目标问题进行优化,但是各个目标函数往往没有共同的度量标准,加权求解带有很大的主观性;因此,有必要引入高效实用的多目标优化算法。

多目标进化算法能很好地找到Pareto前沿,通过选择合适的设计目标,利用多目标进化算法就可

以得到一组控制器设计方案,设计者根据自己的设计偏好,选择合适的参数即可。这里所用的NSGA-II(non-dominated sorting in genetic algorithms)算法就是多目标进化算法中效果非常好的一种。求取了带PSS控制器的单机无穷大系统状态矩阵,基于状态矩阵的特征值的实部和阻尼比提出了设计目标,然后用NSGA-II算法对其进行优化,并将所得结果与传统遗传算法的结果进行了比较。

1 NSGA - II 算法概述

NSGA算法是一种基于Pareto最优解的遗传算法,是一种非常有效的多目标进化算法;NAGA算法的选择、交叉和变异算子和基本遗传算法类似,主要区别在于:NSGA算法在选择算子执行之前根据个体的支配关系对其进行了分层^[3]。

NSGA算法利用适应度共享函数保持了种群的多样性^[3],但实际应用发现还是存在不足,主要体现在:①计算复杂度较高,为 $O(mN^3)$, m 为目标函

数个数, N 为种群大小, ②没有精英策略; ③需要人为指定共享半径 σ_{share} 。

NSGA-II 算法对上述不足进行了改进: ①提出了快速非支配排序算法; ②提出了拥挤度和拥挤度算子; ③引入精英策略。

NSGA-II 算法具体过程如图 1 所示。

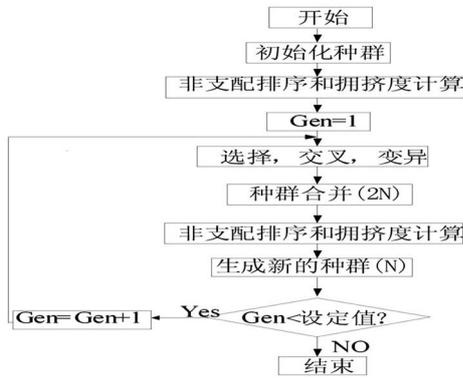


图 1 NSGA-II 算法具体过程图

2 问题陈述

2.1 单机无穷大系统数学模型

单机无穷大系统示意图如图 2 所示, 其中, 发电机采用三阶模型, 励磁系统采用一阶模型, 忽略发电机励磁电流和空载电势之间因为铁心饱和而出现的非线性关系, 忽略线路损耗及分布电容, 则单机无穷大系统的数学模型^[4]如式(1)。

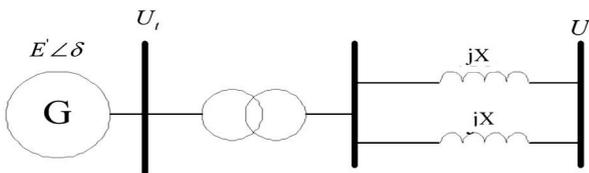


图 2 单机无穷大模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \\ T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - (x_d - x'_d)i_d - E'_q \\ T_A \frac{dE_{fd}}{dt} = K_A(V_{pss} - V_t + V_{ref}) - E_{fd} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $P_e = v_d i_d + v_q i_q$; $V_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}$; $v_d = x_q i_q$; $v_q = E'_q - x'_d i_d$; T_J 为机组惯性时间常数; D 为阻尼系数; T_A 为快速励磁系统时间常数; K_A 为励磁放大倍数; V_t 为发电机端电压; V_{pss} 为 PSS 输出电压; E_{fd} 为

励磁系统输出电压。

将非线性方程式(1)在运行点线性化后, 可以得到系统的线性微分方程组如式(2)。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - K_1 \Delta\delta - D \Delta\omega - K_2 \Delta E'_q \\ T'_{do} \frac{d\Delta E'_q}{dt} = \Delta E_{fd} - k_4 \Delta\delta - k_3 \Delta E'_q \\ T_A \frac{d\Delta E_{fd}}{dt} = K_A (\Delta V_{pss} - K_5 \Delta\delta - K_6 \Delta E'_q) - \Delta E_{fd} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 PSS 结构

这里所采用 PSS 传递函数如图 3 所示。

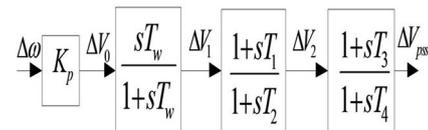


图 3 PSS 传递函数

其微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta V_1}{dt} = K_p \left(\frac{\Delta P_m}{T_J} - \frac{K_1}{T_J} \Delta\delta - \frac{K_2}{T_J} \Delta E'_q - \frac{D}{T_J} \Delta\omega \right) - \frac{1}{T_w} \Delta V_1 \\ \frac{d\Delta V_2}{dt} = \frac{K_p T_1}{T_2} \left(\frac{\Delta P_m}{T_J} - \frac{K_1}{T_J} \Delta\delta - \frac{K_2}{T_J} \Delta E'_q - \frac{D}{T_J} \Delta\omega \right) + \frac{T_w - T_1}{T_2 T_w} \Delta V_1 + \frac{1}{T_2} \Delta V_2 \\ \frac{d\Delta V_{pss}}{dt} = \frac{K_p T_1 T_3}{T_2 T_4} \left(\frac{\Delta P_m}{T_J} - \frac{K_1}{T_J} \Delta\delta - \frac{K_2}{T_J} \Delta E'_q - \frac{D}{T_J} \Delta\omega \right) + \frac{T_3 (T_w - T_1)}{T_4 T_2 T_w} \Delta V_1 + \frac{(T_2 - T_3)}{T_4 T_2} \Delta V_2 + \frac{1}{T_4} \Delta V_{pss} \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2) 将微分方程写成状态方程。

$\Delta \dot{X} = A\Delta x + B\Delta u$ 形式。其中状态变量

$X = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd} \ \Delta V_1 \ \Delta V_2 \ \Delta V_{pss}]^T$, 矩阵

A 为状态矩阵。

2.3 目标函数

为了确保系统的稳定性, 需要将状态矩阵特征根实部限制在负半轴的某一区域, 实现这一目标的数学体现为

$$J_1 = (\sigma_i - \sigma_0) \quad i = 1 \ 2 \cdots n \quad (4)$$

σ_i 是第 i 个运行方式下特征根实部的最大值, n 是运行方式的数目。 σ_0 为门槛值, 取经验值 -2 ^[5]。

同时还需要提高阻尼比来限制最高超调量, 实现这一目标的数学体现为

$$J_2 = (\xi_0 - \xi_i) \quad i = 1 \ 2 \cdots n \quad (5)$$

ξ_i 是第 i 个运行方式下阻尼比的最大值, 这里 ξ_0 取 0.37^[5].

所提出的多目标优化数学模型为

$$\min\{J_1, J_2\}$$

这里约束为 PSS 的参数边界。

$$\begin{cases} 1 \leq K_p \leq 50 \\ 1 \leq T_w \leq 20 \\ 0 \leq T_i \leq 5 \quad i=1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (6)$$

分别采用传统遗传算法和 NSGA - II 算法来解决这个优化问题, 来寻找最优或接近最优解集 $\{K_p, T_w, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ 。

3 算例分析

为了保证系统的鲁棒性, 考虑 3 种不同的运行方式, 如表 1 所示。

表 1 3 种不同的运行方式

负荷	P /p. u.	Q /p. u.	V /p. u.
正常	1.00	0.015	1.04
过载	1.10	0.400	1.04
容性负荷	0.70	0.300	1.04

取种群规模为 200, 进化代数为 1 000, 交叉概率 0.9, 变异概率为 0.1。两种方法的优化结果如表 2 所示。

表 2 两种算法得到的控制器优化结果

	K_p	T_w	T_1	T_2	T_3	T_4
GA	26.32	15.3	0.055	0.018	2.11	3.87
NSGA2	31.08	10.5	0.052	0.024	1.76	4.53

表 3 正常负荷下的特征值和阻尼比

	特征值	阻尼比
不加 PSS	$0.2401 \pm 3.9605i$	-0.0605
GA	$-2.1017 \pm 4.9801i$	0.3888
NSGA2	$-3.3025 \pm 5.9336i$	0.4863

表 3 是系统在正常负荷下得到的振荡模式的特征值和阻尼比, 可见, 不加 PSS 时系统阻尼较弱, 甚至为负; 加 PSS 后, 特征值实部均小于 -2, 阻尼比均大于 0.37, NSGA - II 算法得到的阻尼比更大。

为了体现 NSGA - II 算法的优越性, 设计了 4 种系统稳定性实验, 取发电机的转速和有功功率为观测信号。

①励磁系统扰动; 当 $t = 1$ s 时, 在励磁系统 V_{ref} 加入阶跃信号。

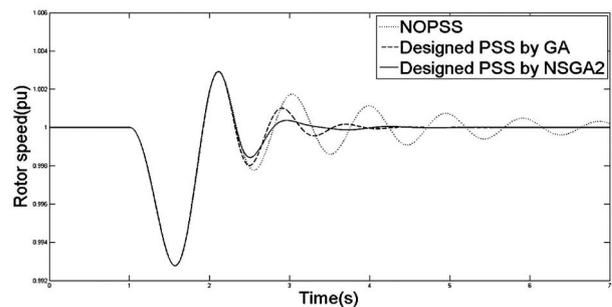
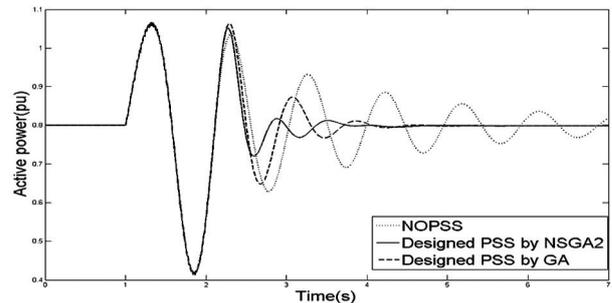


图 4 励磁扰动下发电机转速和有功功率响应曲线

②机械输入功率扰动; 当 $t = 1$ s 时, 在发电机的 P_m 加入阶跃信号。

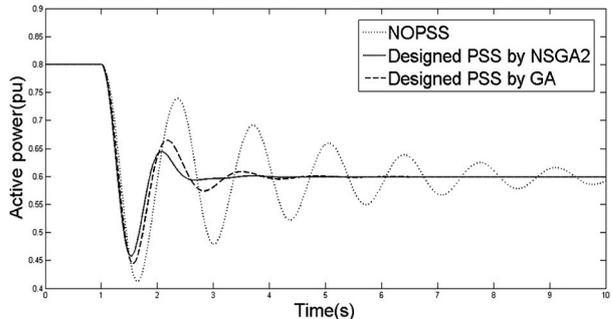
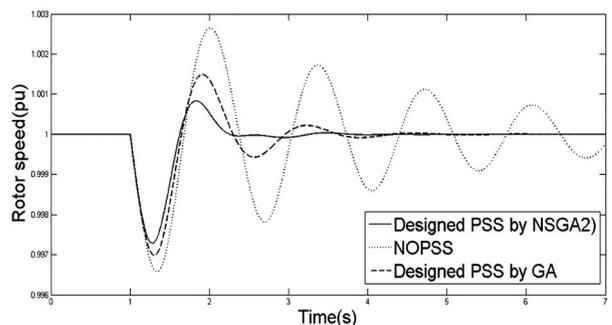


图 5 机械输入扰动下发电机转速和有功功率响应曲线

③三相短路; 当 $t = 1$ s 时, 输电线路发生三相接地短路, 持续时间为 0.2 s。

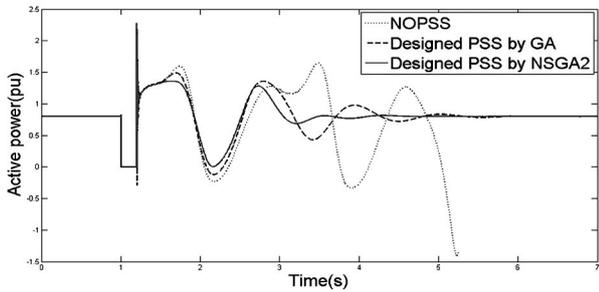
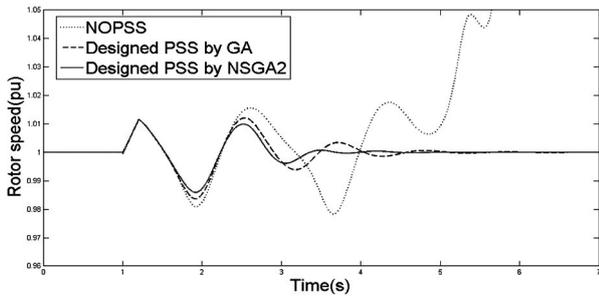


图6 三相接地短路下发电机转速和有功功率响应曲线

④单相短路;当 $t = 1\text{ s}$ 时,输电线路发生 A 相接地短路,持续时间为 0.2 s 。

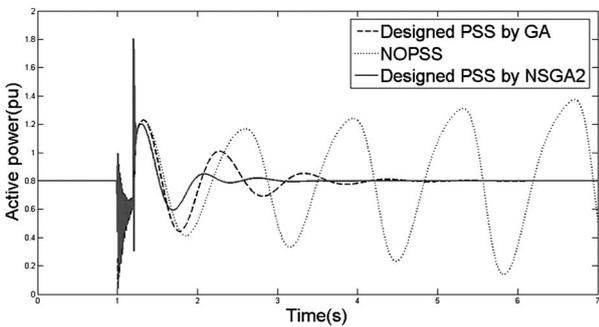
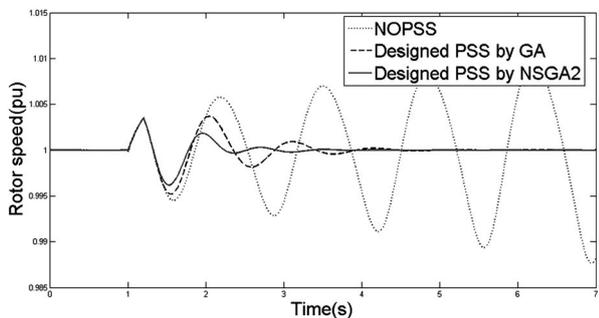


图7 A相接地短路下发电机转速和有功功率响应曲线

当系统受到扰动后,系统会产生 $0.5 \sim 1\text{ Hz}$ 的低频振荡,①和②情况下,不加 PSS 时系统振幅随时间衰减,因为缺乏足够的阻尼,衰减相对缓慢,加 PSS 后衰减明显加快,振幅也大幅减小;而 NSGA - II 算法

设计的 PSS 相对传统遗传算法,效果更优。③和④情况下,不加 PSS 时,系统趋于崩溃,可见无论三相接地短路还是单相接地短路,危害都非常大;当加 PSS 后振荡衰减最后趋于稳定,NSGA - II 算法设计的 PSS 效果同样更优。

4 结 论

设计了 NSGA - II 多目标进化算法优化 PSS 参数来抑制低频振荡,为了验证有效性,设计了 4 种系统稳定性实验。仿真结果表明,所设计的 PSS 极大缩短系统恢复稳态时间,提高了系统稳定性。同时与传统遗传算法设计的 PSS 相比较,仿真结果也说明用 NSGA - II 算法设计的 PSS 性能远优于传统遗传算法设计的 PSS。

参考文献

- [1] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw - Hill, 1994.
- [2] 张鹏翔. 多目标进化算法及其在电力系统中的应用研究 [D]. 华中科技大学, 2004.
- [3] 关志华. 非支配排序遗传算法 (NSGA) 算子分析 [J]. 管理工程学报, 2004, 18(2): 56 - 60
- [4] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] Milad Khaleghi, Mohsen Mohammadian. Design of Two Power System Stabilizers Coordinately Based on Strength Pareto Evolutionary Algorithm [C]. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 1527 - 1532.
- [6] Y. L. Abdel - Magid. Optimal Multi - objective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1125 - 1132.

作者简介:

张利 (1985), 男, 硕士研究生, 从事智能算法在电力系统的应用研究。

(收稿日期: 2013 - 03 - 31)

欢迎订阅 欢迎投稿