

电力系统稳定器参数优化的研究

吴峰^{1,2}, 鲁晓帆², 陈维荣², 郑永康²

(1. 浙江金华市电业局, 浙江 金华 321001; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电力系统稳定器(PSS)的性能受其参数影响很大, 如何对其参数进行协调优化是一个值得深入研究的问题。基于单机无穷大系统和 4 机 2 区域系统模型, 通过采用 SFPSO 算法对电力系统稳定器进行参数的协调优化, 以抑制低频振荡。随机聚焦粒子群算法 SFPSO (Stochastic focusing particle swarm optimization) 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改进粒子群算法 (PSO)。通过仿真测试以及不同算法优化结果的对比, 结果表明, 利用该方法设计的 PSS, 在不同的干扰下都具有良好的性能, 对系统的稳定性提升有较大帮助。

关键词: 电力系统稳定器; 随机聚焦粒子群算法; 单机无穷大系统; 4 机 2 区域系统; 参数优化

Research of parameter optimization of power system stabilizer

WU Feng^{1,2}, LU Xiao-fan², CHEN Wei-rong², ZHENG Yong-kang²

(1. Zhejiang Jinhua Electric Power Bureau, Jinhua 321001, China;

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

Abstract: The performance of power system stabilizer(PSS) is evidently influenced by its parameter. How to optimize parameter of PSS is worth to further research. To suppress the low frequency oscillation, stochastic focusing particle swarm optimization (SFPSO) is proposed to optimize the parameter of PSS based on the model of single-machine with infinite-bus system and 2-area 4-machine system. SFPSO applied to continuous space is an advanced particle swarm optimization (PSO) algorithm with preferable ability of global search and search rate. The simulation results and the comparison results with various optimization algorithms demonstrate that PSS can obtain the favorable performance using SFPSO under different disturbance. It help enhance the stability of system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60870004).

Key words: PSS; SFPSO; single-machine with infinite-bus system; 2-area 4-machine system; parameter optimization

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0029-05

0 引言

提高电力系统稳定性是系统可靠运行的重要保证, 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, 直接导致了系统阻尼的减弱, 从而引发了系统的低频振荡的产生, 严重影响了系统的稳定运行。为提高系统阻尼, 需要在发电机侧加装电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS)。它是抑制低频振荡的一种经济有效的方法, 其原理是通过附加励磁控制提供所需要的附加阻尼来改善系统的阻尼, 增强系统的稳定性^[1-4]。

目前, 国内外学者在 PSS 参数优化协调方面做了很多的研究工作。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^[5-12], 并且起到了一定的优化效果。PSS 设计主要包括三个基本问题: 参数选择、选址和鲁棒性问题。

电力系统稳定器的优化是一个多变量、多约束的混和非线性的规划问题, 从而使优化过程非常复杂。近 30 年来, 国内外许多学者在多个参数优化协调方面进行了大量的研究工作, 并提出了一些有效的方法。可分为线性规划方法、非线性规划方法和全局优化方法。

线性规划方法、非线性优化方法是最早用于优化 PSS 的, 但是它们常常得到局部最优解, 其最终解的质量依赖于初始猜测解的质量。为了求得满意的全局最优解, 使得最终解摆脱对初始解的依赖性, 一些学者尝试应用全局最优算法优化 PSS 的参数。

文献[6]采用免疫遗传算法优化设计 PSS。目标函数以寻找机电振荡模式下阻尼比最小。

文献[7]提出了一种基于进化策略的多机系统参数优化的新方法。在这种方法中, 目标函数设定

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60870004); 西南交通大学博士创新基金 (07-3)

为度量所有机电振荡模态性能的函数，将 PSS 的参数优化规划为带有不等式约束的非光滑优化问题。

文献[8-9]采用粒子群算法优化。目标函数为 PSS 机电暂态模型特征值的实部和衰减速率。在寻优过程中，为了使不良衰减特征值移到复平面虚轴的左侧需寻找特征值的极小值；另一方面，为了增加机电模型的阻尼，需寻找衰减速率的极大值。文献[11]采用模拟退火算法优化 PSS 参数。文献[12]采用禁忌搜索方法优化 PSS 参数。

本文在前述 PSS 优化研究工作的基础上，提出了一种 SFPSO 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，而是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。对标准系统进行 PSS 参数优化和系统性能仿真，定性分析电力系统稳定器 PSS 对系统稳定性的影响。

1 PSS 的设计

1.1 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 $\Delta\omega_p$ 作为输入信号，传递函数如下：

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

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。

1.2 系统其它模型

同步发电机模型采用忽略定子绕组暂态，计及阻尼绕组以及励磁绕组暂态和转子动态的5阶模型。励磁系统模型采用典型的3阶励磁系统：电压调节器1阶，励磁机1阶，励磁负反馈1阶。网络模型采用恒定参数的等值电路代表。

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^[13-14]，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，实现抑制系统中有功功率、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^[13]，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：

$$f = \int_{t_0}^t t \cdot [a_1 |\omega_1(t) - \omega_{s1}|] dt \quad (2)$$

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：

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

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 SFPSO 算法^[15]

粒子群算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是一种现代的启发式随机算法，本质是一种多代理算法，研究由简单个体组成的群落与环境以及个体之间的互动行为。

SFPSO 是改进 PSO 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。

$$\bar{v}_i(n) = \begin{cases} Rand \cdot [R_n - \bar{x}_i(n-1)] & \text{if } fun(\bar{x}_i(n-1)) \geq fun(\bar{x}_i(n-2)) \\ \bar{v}_i(n-1) & \text{if } fun(\bar{x}_i(n-1)) < fun(\bar{x}_i(n-2)) \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{x}_i(n) = \bar{v}_i(n) + \bar{x}_i(n-1) \quad (5)$$

$$\bar{x}_i(n) = \bar{x}_i(n) \quad fun(\bar{x}_i(n)) < fun(\bar{x}_i(n-1)) \quad (6)$$

$$\bar{x}_i(n) = \bar{x}_i(n-1) \quad fun(\bar{x}_i(n)) \geq fun(\bar{x}_i(n-1)) \quad (7)$$

式中： $fun(\bar{x}_i(n))$ 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：

$$R \in \left[\bar{g}_i(n) - \frac{\omega(\bar{g}_i(n) - \bar{x}_{\min})}{(\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min})^{1-\omega}}, \bar{g}_i(n) + \frac{\omega(\bar{x}_{\max} - \bar{g}_i(n))}{(\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min})^{1-\omega}} \right] \quad (8)$$

式中： \bar{x}_{\max} 和 \bar{x}_{\min} 是搜索空间的边界；当 ω 从 1 逐

渐减小为 0 时, R 就从整个解空间收敛到点 $\bar{g}_i(n)$ 。

从式 (4) ~ (7) 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 ω 的控制。在 SFPSO 算法中选择了如下的 ω :

$$\omega = \left(\frac{G-t}{G}\right)^\delta \quad (9)$$

式中: G 为最大迭代次数; δ 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:

$$\mu = \lfloor \omega \cdot s + 1 \rfloor \quad (10)$$

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 ω 的作用, 将分组数 μ 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。

其算法流程如下:

Step 1: 初始化一群粒子, 随机确定其位置;

Step 2: 计算每个粒子的适应度;

Step 3: 进行分组并找到每个分组中的 \bar{g}_{best} ;

Step 4: 根据式(4)~(7)更新粒子的速度和位置;

Step 5: 计算每个粒子的适应度;

Step 6: 根据式 (8) 确定 $\bar{x}_i(n)$;

Step 7: 如未达到结束条件 (通常为足够好的适应度值或达到一个预设最大迭代次数), 则返回 Step 3。

3 算例

3.1 单机无穷大系统

单机无穷大系统仿真模型如图 1 所示。其中 $T_w=5, T_2=0.05, T_4=0.05$ ^[4]。通过采用种群大小为 50、进化代数为 50 的 SFPSO 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粒子群算法 (PSO)^[10] 参数优化结果进行了比较。

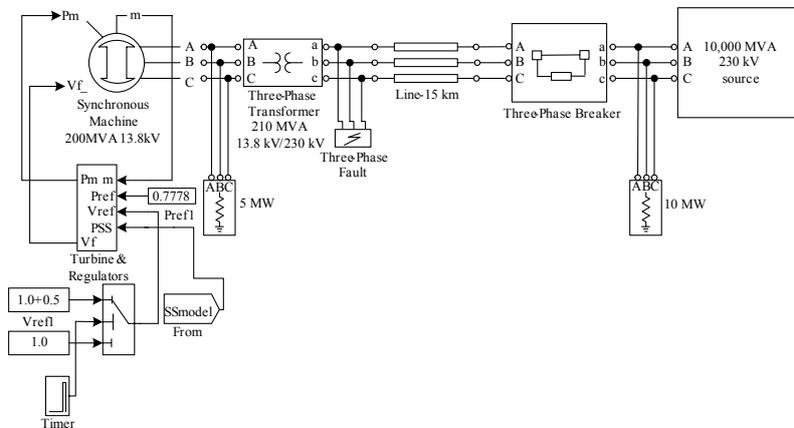


图 1 单机无穷大电力系统仿真模型

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

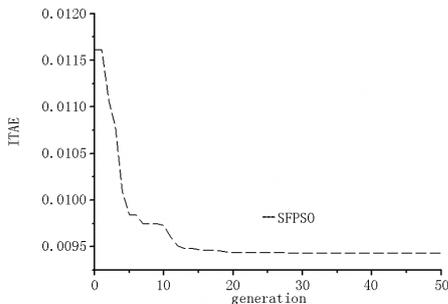


图 2 搜索过程中 ITAE 的变化趋势

Fig.2 Trend of ITAE during searching

表 1 PSO、SFPSO 的参数优化结果

Tab.1 Parameter optimization result of PSO and SFPSO

参数 \ 算法	PSO	SFPSO
K	19.606 5	188.603
T_1	0.025 6	0.111 0
T_3	0.614 6	0.214 6

表 1 列举了参数优化的结果。图 2 所示为搜索过程中 ITAE 的变化趋势。表 2 为单机系统的机电模式, 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。PSS 参数优化后，系统机电振荡模式阻尼有效的增加，提高到 0.411 6，有效地抑制了低频振荡。

表 2 单机系统的机电模式

Tab.2 The characteristic value of the single machine system

系统未装 PSS		PSO 优化的 PSS		SFPSO 优化的 PSS	
特征值	-0.672±j10.767	特征值	-1.275±j4.7476	特征值	-1.725±j3.818
阻尼比	0.062 3	阻尼比	0.259 3	阻尼比	0.411 6
频率	1.713 6	频率	0.756 0	频率	0.608

为了评价基于 SFPSO 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 PSO、SFPSO 算法优化的 PSS 系统进行动态仿真。

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，从而影响系统的稳定。

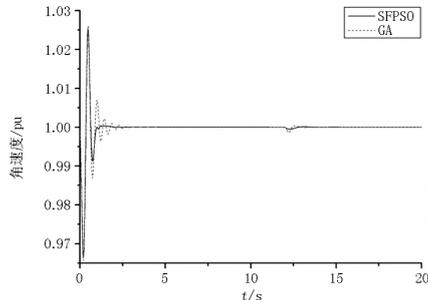


图 3 发电机的转子角速度动态响应曲线 (加 5% 扰动)
Fig.3 Dynamic response curve of rotor speed of generator (adding disturbance of 5%)

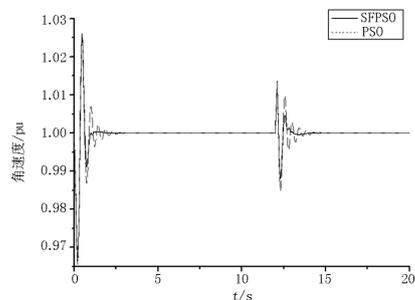


图 4 发电机转子角速度动态响应曲线 (三相短路故障)

Fig.4 Dynamic response curve of rotor speed of generator (the fault of three-phase short circuit)

图 4 为三相短路故障持续 0.1 s 后重合闸成功和三相短路故障持续 0.1 s 后转子角速度变化的结果。

由仿真图可见，对于小扰动，采用 SFPSO 算法优化的 PSS，转子角速度摆动幅度、振荡次数均比较少。发电机的转子角速度在 1 s 后就趋于平稳。而 PSO 算法优化的 PSS 加装在系统后，发电机要过 2~3 s 才能趋于平稳。而对于大扰动，采用 SFPSO 算法优化的 PSS 也有类似的良好表现。所以 PSS 能够很快地平息低频振荡，提高了转子的暂态特性。

3.2 4 机 2 区域系统

系统由两个区域组成，如图 5 所示。中间通过较长的联络线相连。每个区域有两台发电机，记为 G₁~G₄，其额定容量均为 900 MVA。区域 1 负荷接在 7 号母线，区域 2 负荷接在 8 号母线。其中，母线 1 为平衡节点。发电机为 5 阶模型，配有自并励静止励磁系统。系统模型具体参数见文献。

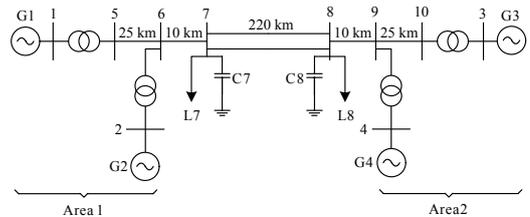


图 5 4 机 2 区域仿真系统

Fig.5 A test system of two-area four-machine

根据参与因子的选址方法^[6]，将 PSS 装设在发电机 G₂、G₃ 上，其中 $T_{wp}=20$ ， $T_{2p}=0.02$ ， $T_{4p}=0.02$ ($p=2, 3$)。通过采用种群大小为 100、进化代数数为 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标准粒子群算法 (PSO- ω) 以及自适应遗传群算法 (AGA) 的参数优化结果进行了比较。

表 3 PSS 参数优化结果

Tab. 3 Parameter optimization result of PSS

机组	算法	PSO- ω	AGA	SFPSO
	G2	K_p	19.609	20.850
	T_{1p}	0.037	0.676 5	0.442
	T_{3p}	0.034	0.029 3	0.254
G4	K_p	12.574	39.178	39.675
	T_{1p}	0.027	0.134 4	0.314
	T_{3p}	0.019	0.045 2	0.208

表 3 列举了参数优化的结果。图 6、7 的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、振荡次数,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。

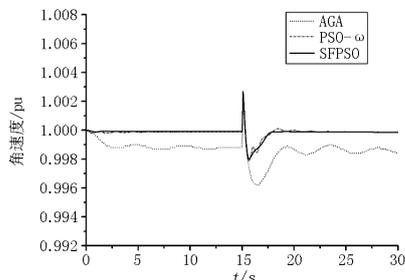


图 6 G2 转子角速度动态响应曲线 (加 5% 扰动)

Fig.6 Dynamic response curve of rotor speed of generator2 (adding disturbance of 5%)

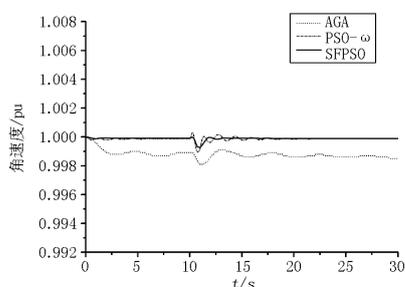


图 7 G2 转子角速度动态响应曲线(三相短路故障)

Fig.7 Dynamic response curve of rotor speed of generator 2(the fault of three-phase short circuit)

由于 PSS 的结构原理是来自于单机无穷大系统的分析,并且电力系统的运行状态变化多样,一般基于一种运行工况整定配置的 PSS 参数可能在其它运行工况下失效。理想的 PSS 参数应能适应系统的不同运行工况。本文选择的是其中最严重的工况进行暂态测试,提供充分的系统稳定裕度。

4 结论

本文运用 SFPSO 算法分别对单机无穷大和 4 机 2 区域系统的 PSS 参数进行了优化,并做稳定性仿真测试。结果显示经 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有效地抑制,提高了系统的动态稳定性。同时,也验证了 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。

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] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

LIU Qu. Stability of Power System and Excitation Control of Generator[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

[3] 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.

FANG Si-li, ZHU Fang. The Principle and Application of Power System Stabilizer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

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

[5] 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.

[6] 刘杨名. 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.

[7] 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(in Chinese).

[8] 荣雅君,贾艳,刘琳,等. 基于粒子群优化算法的电力系统稳定器设计[J]. 继电器, 2008, 36(4): 28-31.

RONG Ya-jun, JIA Yan, LIU Lin, et al. Optimal Design of Power System Stabilizer using Particle Swarm Optimization[J]. Relay, 2008, 36(4): 28-31.

[9] 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).

[10] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proc of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks[C]. 1995.1942-1948.

[11] Abido M A. Robust Design of Multimachine Power System Stabilizers Using Simulated Annealing[J]. IEEE Trans Energy Conversion, 2000, 15 (3): 297-304.

(下转第 44 页 continued on page 44)

- Power System Technology, 2007, 31(12): 22-26.
- [3] 祁亨年. 支持向量机及其应用研究综述[J]. 计算机工程, 2004, 30(5): 6-9.
QI Heng-nian. Support Vector Machines and Application Research Overview[J]. Computer Engineering, 2004, 30(5): 6-9.
- [4] 宋晓芳, 陈劲操. 基于支持向量机的动态电能质量扰动分类方法[J]. 电力自动化设备, 2006, 34(4): 39-42.
SONG Xiao-fang, CHEN Jin-cao. Classification Method of Dynamic Power Quality Disturbances Based on SVM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 34(4): 39-42.
- [5] GUNN S R. Support Vector Machines for Classification and Regression[D]. Southampton: University of Southampton, 1998.
- [6] Samantaray S R, Dash P K, Panda G. Fault Classification and Ground Detection Using Support Vector Machine[D]. Bhubaneswar(India): National Institute of Technology.
- [7] SHEN Bin, YAO Min. SVM and Classification Ensembles Based High-voltage Transmission Line Fault Diagnosis[Z].
- [8] 郭小荟, 马小平. 基于支持向量机的提升机制动系统故障诊断[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(11): 813-817.
GUO Xiao-hui, MA Xiao-ping. Mine Hoist Braking System Fault Diagnosis Based on a Support Vector Machine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(11): 813-817.
- [9] 江伟, 罗毅, 等. 基于多类支持向量机的变压器故障诊断模型[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 52-55.
JIANG Wei, LUO Yi, et al. Fault Diagnosis Model for Power Transformer Based on Multi-class Support Vector Machine[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 52-55.
- [10] 邵华平, 覃征, 等. SVM 算法及其应用研究[J]. 兰州交通大学学报, 2006, 48(2): 104-106.
SHAO Hua-ping, QIN Zheng, et al. Algorithm of SVM and its Application[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006, 48(2): 104-106.
- [11] 马笑潇, 黄席樾, 等. 基于 SVM 的二叉树多类分类算法及其在故障诊断中的应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 272-276.
MA Xiao-xiao, HUANG Xi-yue, et al. 2PTMC Classification Algorithm Based on SVM and Its Application to Fault Diagnosis[J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 272-276.
- [12] 初燕, 付忠广, 等. 基于支持向量机的故障诊断方法探讨[J]. 动力工程, 2005, 25(10): 691-694.
CHU Yan, FU Zhong-guang, et al. Exploration of Fault Diagnosis Method Based on Support Vector Machine[J]. Journal of Power Engineering, 2005, 25(10): 691-694.
- [13] 贾嵘, 徐其惠, 等. 最小二乘支持向量机多分类法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 110-113.
JIA Rong, XU Qi-hui, et al. Fault Diagnosis of Transformer Using Multi-class Least Squares Support Vector Machine[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 110-113.
- [14] <http://www.esat.kuleuven.ac.be/sista/lssvmlab/toolbox.Html>.

收稿日期: 2009-04-02; 修回日期: 2009-05-14

作者简介:

王成江 (1971-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力设备状态监测和故障诊断, 电力市场和数据库系统等方面的研究与开发工作;

马新明 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力设备在线检测方面的研究; E-mail: yaibals@163.com

官云 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力设备在线检测方面的研究。

(上接第 33 页 continued from page 33)

- [12] Abido M A, Abdel Magid Y L. Robust Design of Multimachine Power System Stabilizers Using Tabu Search Algorithm[J]. IEE Proceeding-Gener, Transm, and Distrib, 2000, 147 (6): 387-394.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 郑永康. 相空间重构与支持向量机结合的短期负荷预测研究(博士学位论文)[M]. 成都: 西南交通大学, 2008.
ZHENG Yong-kang. Short-term Load Forecasting Based on Phase Space Reconstruction and Support Vector Machine, Doctoral Dissertation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-06-28

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

鲁晓帆 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

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。