

基于混沌变异粒子群算法的 PSS 与 SVC 阻尼控制器协调优化设计

周金环¹, 车延博¹, 舒展², 胡晓青¹

(1. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津 300072;
2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 同步发电机的电力系统稳定器(PSS)与静止无功补偿器(SVC)中附加阻尼控制器相结合可以有效抑制系统低频振荡,从而提高电网的动态稳定性。为使阻尼控制器参数相互匹配,本文提出一种基于混沌变异粒子群优化(CMPSO)算法的 PSS 与 SVC 阻尼控制器的参数协调计算方法。该方法以传统粒子群优化(PSO)算法为基础,为避免种群陷入局部最优,算法迭代后期对粒子进行混沌变异操作,从而提高算法的全局搜索能力。综合考虑系统的超调量和响应速率,以阻尼比最大和特征根实部最小为目标函数,将多机电力系统中阻尼控制器参数设计问题转换为带有不等式约束的目标优化问题。在四机两区域系统上的仿真算例表明,CMPSO 算法与传统 PSO 相比具有更好的全局寻优能力。PSS 与 SVC 阻尼控制器的协调优化设计能够在不同的干扰下有效抑制低频振荡,增强电力系统的暂态稳定性,减少故障后的电压波动。

关键词: 电力系统稳定器; 静止无功补偿器; 混沌变异粒子群优化; 低频振荡

DOI: 10.12067/ATEEE1712022 **文章编号:** 1003-3076(2018)05-0058-07 **中图分类号:** TM44

1 引言

随着互联电网规模的不断扩大,高增益、快速励磁技术被广泛应用。受电网外界条件与各种内部因素干扰的影响,低频振荡问题已经成为影响电网稳定运行、限制电网供电能力的重要因素之一^[1]。电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)通过在励磁系统中附加阻尼控制信号,可以有效抑制系统低频振荡和提高电力系统的动态稳定性^[2,4]。

灵活交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)设备运行特性灵活,可以方便实现系统潮流控制和电压控制^[2]。静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)是 FACTS 中重要的并联补偿装置,除了可以为系统提供无功支持和维持节点电压稳定外,还可以引入与 PSS 类似的附加控制,达到抑制系统低频振荡的效果^[5,6]。

传统阻尼控制器的设计方法主要包括相位补偿法和极点配置法^[7]。由于控制器参数与系统性能

之间呈现非线性关系,采用传统的方法难以求出控制器的最优参数。智能算法模型简易、通用性强且搜索能力强大,是解决优化问题的有效策略之一。其中粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法因结构简单、效率高而被广泛应用于各种工程优化问题^[8]。文献[9,10]利用 PSO 算法对 PSS 的参数进行寻优设计。文献[11]利用有功灵敏度分析选择可控串联补偿器(Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC)的最佳安装位置,利用 Hankel 奇异值和右半平面零点分析确定附加控制器的输入信号,采用 PSO 算法协调设计 PSS 和 TCSC 阻尼控制器。单一的 PSO 优化方法收敛速度较慢、易陷入局部最优,对其算法的改进,已逐渐成为增加 PSO 算法优化能力的重要途径。文献[12]采用与混沌结合的 PSO 算法寻找安装 PSS 的最优位置。

本文在标准粒子群优化算法的基础上,采用混沌变异粒子群优化(Chaotic Mutation based Particle Swarm Optimization, CMPSO)算法对 PSS 与 SVC 阻

收稿日期: 2017-12-12
基金项目: 国网江西省电力公司科技项目(521820170022)
作者简介: 周金环(1994-),女,河北籍,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动;
车延博(1972-),男,山东籍,副教授,博士,研究方向为电力电子与电力传动。

尼控制器进行协调优化,进一步提高多机电力系统的稳定性。综合考虑系统的超调量和响应速率,以阻尼比最大和特征根实部最小为目标函数,将 PSS 与 SVC 阻尼控制器的参数协调优化问题转化为带有不等式约束的优化问题。以 IEEE 四机两区域系统模型为算例,迭代过程表明 CMPSO 具有比标准 PSO 更强的全局寻优能力。通过时域仿真验证了 PSS 与 SVC 的协调优化设计能够有效抑制系统低频振荡。

2 系统模型

2.1 同步发电机模型

现代电力电子技术的发展使快速响应、高放大倍数的励磁系统得以实现,从而极大地改善了电力系统的暂态稳定性。然而多机大电力系统中并联运行的发电机易受扰动影响而产生持续低频振荡,PSS 是抑制这种振荡的一种有效手段。简化后包含 PSS 的快速励磁系统控制框图如图 1 所示。其中, U_G 、 U_{G_ref} 分别为发电机机端电压测量值和参考值; K_A 、 T_A 分别为励磁系统的增益和时间常数; ΔU_{pss} 为 PSS 输出信号; E_{fd} 为励磁电压。

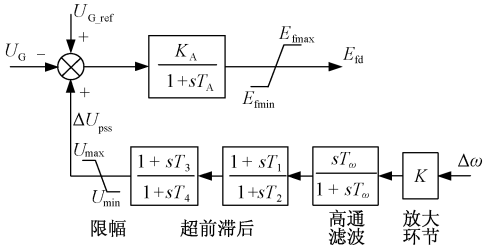


图1 具有 PSS 的励磁系统控制框图

Fig. 1 Control block diagram of excitation system with PSS

电力系统稳定器通常包含信号放大(放大系数为 K)、高通滤波(滤波时间常数为 T_w)、超前滞后(超前滞后时间常数为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4)和限幅等环节。其基本原理是通过给自动电压调节器(Automatic Voltage Regulator, AVR)提供一个辅助控制信号 ΔU_{pss} 调节励磁电流,使发电机产生一个与转子角速度偏差 $\Delta\omega$ 同相位的电磁转矩分量,进而实现降低电力系统低频振荡和增加系统阻尼的目的,其动态表达式为:

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A (U_{ref} - U_G + \Delta U_{pss}) - E_{fd}}{T_A} \quad (1)$$

PSS 通常以转子角速度偏差 $\Delta\omega$ 作为输入信号,输入信号也可以采用电磁功率偏差 ΔP 或机端

频率偏差 Δf 。PSS 主要用于抑制局部系统振荡,而区域间振荡的抑制需要与其他方式相配合。

2.2 SVC 附加阻尼控制器模型

SVC 是一种快速调节的无功电源,它与电网交换可连续调节无功功率,以维持装设点的电压稳定。电压控制是 SVC 的基本控制模式,可改善电压的暂态稳定性,然而仅通过电压调节获得的阻尼作用往往较小。要加强 SVC 对电力系统机电振荡的阻尼,必须采用额外的辅助控制^[13]。与 PSS 类似,SVC 也可引入以 $\Delta\omega$ 为输入的附加阻尼控制,控制框图如图 2 所示。其中, U_{svc} 、 U_{svc_ref} 分别为 SVC 安装点的测量电压和参考电压; K_s 、 T_s 分别为 SVC 系统的增益和时间常数; ΔU_{svc} 为实现阻尼控制的附加调制信号; B 为等效电纳。

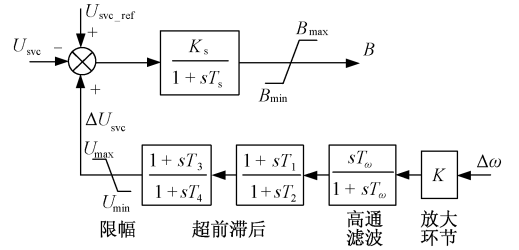


图2 SVC 附加阻尼控制框图

Fig. 2 Control block of SVC with additional damping controller

SVC 等效电纳 B 的动态表达式为:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{K_s (U_{svc_ref} - U_{svc} + \Delta U_{svc}) - B}{T_s} \quad (2)$$

2.3 协调优化问题

虽然通过对 PSS 和 SVC 各自附加阻尼控制能够提高系统的抗扰动能力,但是在同时使用 PSS 和 SVC 的场合,二者可能产生相互影响,甚至导致系统不稳定。因此需要对 PSS 和 SVC 进行协调优化设计,保证系统的整体性能^[14,15]。

为了综合考虑系统的超调量和响应速率,选取阻尼比最大和特征根实部最小为目标函数,PSS 与 SVC 阻尼控制器参数协调设计问题可以描述为:

$$\min J = \sum_{\sigma_i \leq \sigma_0}^N (\sigma_i - \sigma_0) + \alpha \sum_{\xi_i \geq \xi_0}^N (\xi_0 - \xi_i) \quad (3)$$

式中, N 为具有附加阻尼控制器的 PSS 与 SVC 个数; ξ_i 为第 i 个振荡模态的阻尼比; ξ_0 为预先设置的最小阻尼比; σ_i 为第 i 个振荡模态的特征值实部; σ_0 为预先设置的最大特征值实部。

PSS 与 SVC 的阻尼控制环节中,隔直环节时间常数 T_w 取定值 10s。待优化参数为阻尼控制器的

增益 K_i 和时间常数 $T_{j,i} (j=1, 2, 3, 4)$, 问题的约束条件为:

$$\begin{cases} K_i^{\min} \leq K_i \leq K_i^{\max} \\ T_{j,i}^{\min} \leq T_{j,i} \leq T_{j,i}^{\max} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

一般 K_i 取值范围为 $1 \sim 100$, $T_{j,i}$ 取值范围为 $0.1 \sim 20\text{s}$ 。

3 混沌变异粒子群优化算法

PSO 算法是一种群体智能优化算法, 算法描述如下: 在 D 维的搜索空间中, 种群 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 由 n 个粒子组成。其中第 i 个粒子为一个 D 维的向量 $\mathbf{X}_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D)^T$, 表示第 i 个粒子在 D 维搜索空间的位置, 也可表示为问题的一个可能解。依照目标函数可算出每个粒子位置 \mathbf{X}_i 所对应的适应度值。第 i 个粒子的速度为 $\mathbf{V}_i = (V_i^1, V_i^2, \dots, V_i^D)^T$, 其个体极值为 $\mathbf{P}_i = (P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^D)^T$, 种群的群体极值为 $\mathbf{P}_g = (P_g^1, P_g^2, \dots, P_g^D)^T$ 。

在每一次的迭代中, 粒子通过群体极值与个体极值更新自身的位置、速度, 即

$$\mathbf{V}_i^{k+1} = w\mathbf{V}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{P}_i^k - \mathbf{X}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{P}_g^k - \mathbf{X}_i^k) \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + \mathbf{V}_i^{k+1} \quad (6)$$

式中, k 为当前迭代次数; w 为惯性权重, 其值可随迭代次数的增加而动态改变; c_1 和 c_2 为非负的常数, 称为加速因子或学习因子; r_1 和 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 区间的随机数。为防止粒子盲目地搜索, 一般将其位置和速度限定在指定区间内。

标准 PSO 算法通过跟踪个体极值完成极值寻优, 操作过程简单, 且能够快速收敛。但随着迭代次数不断增加, 在种群收敛集中的同时, 各粒子也越来越相似, 逐渐出现惰性, 算法可能陷入局部最优。

混沌是一种无规则运动状态, 具有遍历性、随机性的特点。混沌 Logistic 映射表示为:

$$Z_{i+1} = \mu Z_i (1 - Z_i) \quad i=1, 2, \dots \quad \mu \in (0, 4] \quad (7)$$

式中, Z_i 为第 i 个控制变量; μ 为混沌因子。当 $\mu=4$ 时, 式(7)所表示的映射完全进入混沌状态, 混沌空间为 $[0, 1]$ 。

针对标准 PSO 算法的不足, 本文提出一种具有较好的全局搜索能力的 CMPSO 算法。在迭代过程中, 引入群体早熟收敛的判断机制, 如式(8)所示:

$$\delta^k = \max_{i=1, \dots, n} \|\mathbf{X}_i^k - \mathbf{P}_g^k\| \quad (8)$$

式中, δ^k 为在第 k 次迭代时粒子的最大欧几里得范数, δ^k 满足式(9):

$$\delta^k < R\varepsilon \quad (9)$$

式中, R 为搜索半径; ε 为指定的阈值。

在检测到粒子群过早收敛后, 将粒子位置按照式(10)进行更新, 引导粒子跳出早熟状态, 进一步搜索全局最优值。

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{P}_g^k + R(2\mathbf{Z}_i - 1) \quad (10)$$

算法流程图如图3所示。

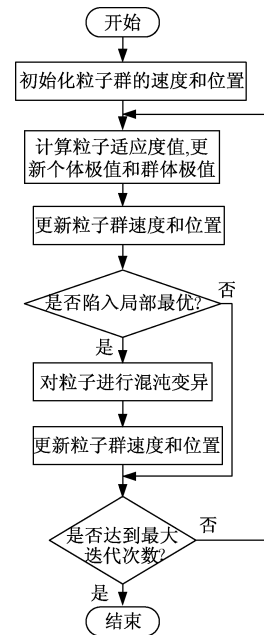


图3 优化算法流程图

Fig. 3 Flowchart of proposed optimization algorithm

4 算例仿真分析

4.1 PSS 与 SVC 参数优化结果

本文以四机两区域系统作为算例来验证不同优化算法对 PSS 与 SVC 参数整定的效果。系统单线图如图4所示, 其中 L_7 、 L_9 为负载。算例系统中两个区域通过两条额定电压 230kV、基准容量 1000MV·A 的交流联络线相连构成。每个区域都装设有两个相同的隐极发电机, 每台发电机的额定容量为 900MV·A, 额定电压为 20kV, 区域 1 向区域 2 输出 413MW 的功率, 在联络节点 8 处装有一台容量为 $\pm 200\text{MVar}$ 的 SVC, 模型参数如表 1 所示, 具体可参见文献[1]。

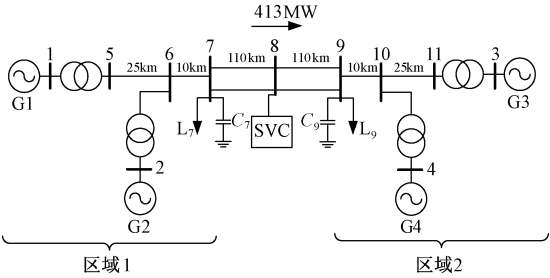


图 4 四机两区域算例系统单线图

Fig.4 Single-line diagram of four-machine two-area power system

表 1 四机两区域算例系统参数

Tab.1 Parameters of four-machine two-area power system		
参数		数值
发电机	额定容量/(MV·A)	900
	额定电压/kV	20
	额定容量/(MV·A)	900
变压器	变比	20kV/230kV
	阻抗(pu)	0 + j0.15
输电线路	电阻/(Ω/km)	0.0529
	电感/(mH/km)	1.68
	电容/(μF/km)	10.5

为更好地体现协调控制的优化效果,对采用标准 PSO 算法与混沌变异 PSO 算法的优化参数结果作比较。优化过程中种群规模为 100,迭代次数为 100。各控制器参数在两种算法下的优化结果如表 2 所示。

图 5 为目标函数分别在 PSO 与 CMPSO 优化后的收敛性能变化图。可以看出,经 CMPSO 优化后的系统性能指标收敛更快,性能更好。

4.2 小干扰稳定性仿真分析

在 $t=1s$ 时对发电机 G1 的励磁系统参考电压施加 5% 幅度的扰动,持续时间 0.2s。此干扰会使发电机端电压产生变化,从而影响系统的稳定。发生小扰动时,PSS 与 SVC 系统在 CMPSO 与 PSO 算

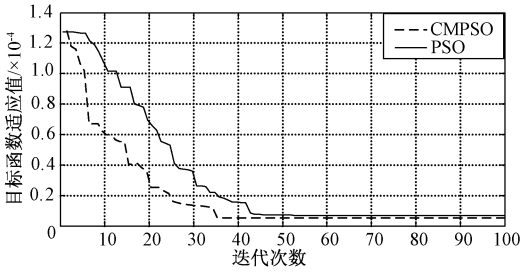


图 5 不同算法的收敛特性

Fig.5 Convergence characteristics of different algorithms

法优化下,区域间传输功率、发电机 G1 转速特性和 SVC 处电压分别如图 6 ~ 图 8 所示。根据仿真结果可知,SVC 阻尼控制器具有抑制系统振荡的作用。在相同条件下,与 PSO 算法优化的结果相比,采用 CMPSO 算法优化的 PSS 与 SVC 可以更好地抑制低频振荡,系统传输功率、电机转速等特性的振荡幅度和次数也更小。以上表明采用 CMPSO 算法优化后的控制器,可更好地提高电力系统的稳定性。

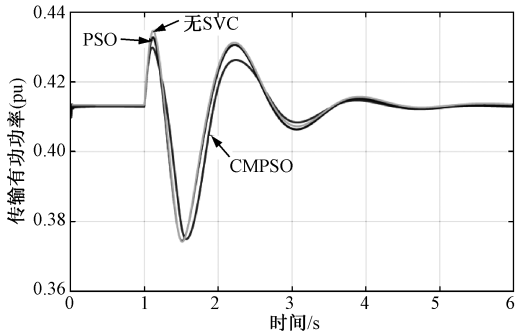


图 6 小扰动下区域间传输功率曲线

Fig.6 Power transmission curves under small disturbance

4.3 暂态稳定性仿真分析

为了进一步比较 CMPSO 与 PSO 算法优化后系统的稳定性,对系统进行故障测试。假设线路中点母线 8 处在 $t=1s$ 时发生三相接地短路,在 1.2s 时故障清除。三相短路故障持续 0.2s 后,线路传输功

表 2 基于 PSO 与 CMPSO 优化后的多机系统 PSS 与 SVC 控制器参数

Tab.2 Parameters of PSS and SVC controller in multi-machine system given by PSO and CMPSO										
参数	CMPSO					PSO				
	K	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	K	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s
PSS1	39	0.05	0.015	0.09	0.015	18	0.05	0.012	0.045	0.01
PSS2	30	0.08	0.015	0.09	0.01	57	0.05	0.01	0.07	0.015
PSS3	43	0.045	0.014	0.08	0.015	14	0.045	0.015	0.05	0.01
PSS4	23	0.06	0.015	0.08	0.013	17	0.05	0.014	0.08	0.03
SVC	23	0.05	0.25	0.01	0.3	60	0.05	0.3	0.01	0.3

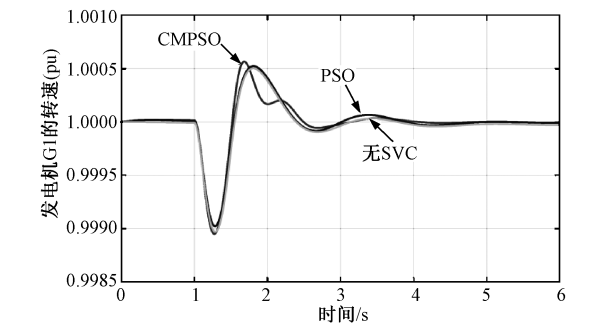


图 7 小扰动下发电机 1 转速响应曲线

Fig. 7 Response curves of generator under small disturbance

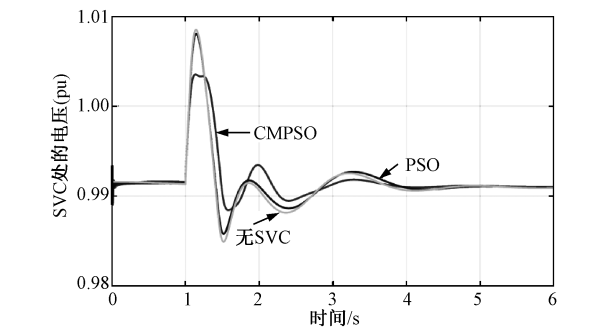


图 8 小扰动下 SVC 安装处的电压曲线

Fig. 8 Voltage curves of SVC under small disturbance

率、发电机 G1 转速及 SVC 接入点电压的变化分别如图 9 ~ 图 11 所示。可以看出,PSS 与 SVC 协调控制能够有效地抑制大干扰下引起的系统振荡,降低故障后的电压波动,使发电机功角、转速和节点电压较快恢复到正常水平。与采用标准 PSO 算法相比,经 CMPSO 优化后的控制器效果更优。

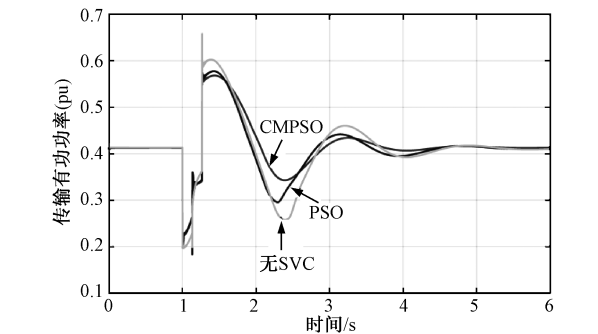


图 9 大扰动下区域间传输功率曲线

Fig. 9 Power transmission curves under large disturbance

5 结论

针对 PSS 与 SVC 阻尼控制器的设计难以采用线性方法的问题,本文提出混沌变异粒子群优化算法,将混沌变异原理引入粒子群优化算法中,并将其

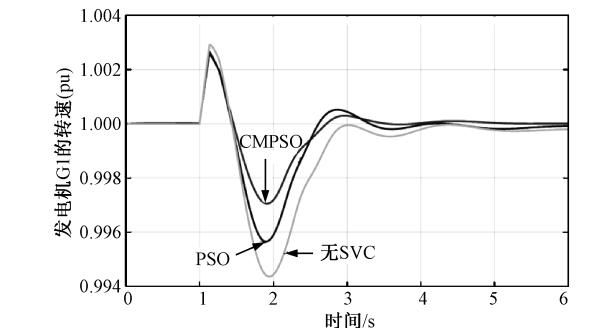


图 10 大扰动下发电机 1 转速响应曲线

Fig. 10 Response curves of generator under large disturbance

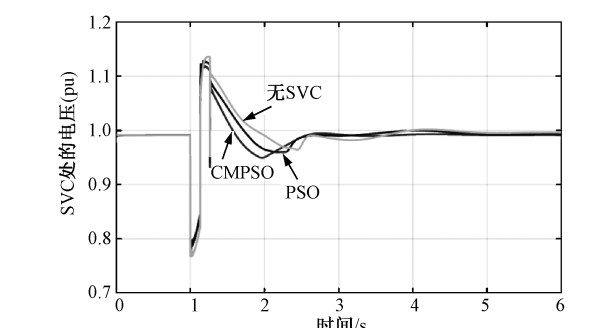


图 11 大扰动下 SVC 安装处的电压曲线

Fig. 11 Voltage curves of SVC under large disturbance

应用于多机系统 PSS 与 SVC 阻尼控制器参数的协调优化问题中。选取时间乘以发电机转速误差的绝对值积分最小为目标函数,将 PSS 与 SVC 参数协调优化问题转化为带有不等式约束的优化问题。四机两区域系统算例仿真结果表明,本文所提的 CMPSO 优化算法具有比标准 PSO 算法更强的全局寻优能力。通过时域仿真验证了 PSS 与 SVC 的协调优化设计能够有效抑制多机系统的低频振荡,提高系统的小干扰稳定性与暂态稳定性。

参考文献 (References):

[1] 项丽, 鲍颜红, 耿天翔, 等 (Xiang Li, Bao Yanhong, Geng Tianxiang, et al.). 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法 (Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (18): 18-22.

[2] Khezri R, Bevrani H. AVR and PSS coordinated based fuzzy approach for transient stability enhancement [A]. 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering [C]. 2015. 1659-1664.

[3] 冯双, 蒋平, 吴熙 (Feng Shuang, Jiang Ping, Wu

- Xi). 抑制共振机理低频振荡的 PSS 设计方法 (PSS design method for suppressing low-frequency oscillation of resonance mechanism) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (7): 1-6.
- [4] 匡洪海, 吴政球, 李圣清, 等 (Kuang Honghai, Wu Zhengqiu, Li Shengqing, et al.). DFIG-FMAC-PSS 控制对风电并网系统的暂态稳定性改善 (Transient stability improvement of wind power integrated system based on DFIG-FMAC-PSS control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (1): 35-40.
- [5] 迟永宁, 关宏亮, 王伟胜, 等 (Chi Yongning, Guan Hongliang, Wang Weisheng, et al.). SVC 与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性 (Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2007, 31 (3): 95-100.
- [6] Weiss M, Abu-Jaradeh B N, Chakraborty A, et al. A wide-area SVC controller design for inter-area oscillation damping in WECC based on a structured dynamic equivalent model [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 1-11.
- [7] Cai L J, Erlich I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (1): 294-300.
- [8] 黄松, 田娜, 纪志成 (Huang Song, Tian Na, Ji Zhicheng). 一种新的自适应变异粒子群优化算法在 PMSM 参数辨识中的应用 (Study of PMSM parameter identification using particle swarm optimization with adaptive mutation probability) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (6): 67-73.
- [9] 赵辉, 刘鲁源, 张更新 (Zhao Hui, Liu Luyuan, Zhang Gengxin). 基于微粒群优化算法的最优电力系统稳定器设计 (Optimal design of power system stabilizer using particle swarm optimization) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (3): 32-35.
- [10] El-Zonkoly A M. Optimal tuning of power systems stabilizers and AVR gains using particle swarm optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31 (3): 551-557.
- [11] Hasanvand H, Arvan M R, Mozafari B, et al. Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 194-206.
- [12] Eslami M, Shareef H, Mohamed A, et al. Optimal location of PSS using improved PSO with chaotic sequence [A]. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering [C]. 2011. 253-258.
- [13] Hemeida A M, El-Saady G. Damping power systems oscillations using FACTS combinations [A]. 39th International Universities Power Engineering Conference [C]. 2004. 1: 333-337.
- [14] Karupiah N, Malathi V. Damping of power system oscillations by tuning of PSS and SVC using particle swarm optimization [J]. Tehnicki Vjesnik, 2016, 23 (1): 221-227.
- [15] Abido M A, Abdel-Magid Y L. Coordinated design of a PSS and an SVC-based controller to enhance power system stability [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2003, 25: 695-704.

Coordinated optimization design between PSS and damping controller of SVC based on CMPSO algorithm

ZHOU Jin-huan¹, CHE Yan-bo¹, SHU Zhan², HU Xiao-qing¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: The combination of power system stabilizer (PSS) in synchronous generator and additional damp controller in static var compensator (SVC) can effectively damp low frequency oscillation and enhance the dynamic stability of power system. To achieve parameter matching of damp controllers, this paper presents a coordination method for calculating controller parameters of PSS and damp controller in SVC based on chaotic mutation based particle swarm optimization (CMPSO) algorithm. Based on basic PSO theory, chaotic mutation operation is carried out in the late stage of iteration to avoid falling into local optimum, which improves the global searching ability of PSO.

Considering the control performance of overshoot and response time of system, the coordination design problem is formulated as an optimization problem with inequality constraints, and the objective function is selected to maximize the damping ratio and minimize the real part of eigenvalue. Simulation example on four-machines-two-area system shows that the CMPSO algorithm offers a better global searching ability than basic PSO algorithm. Coordination design between PSS and damping controller of SVC can effectively damp low frequency oscillation, improve transient stability of power system, and reduce voltage fluctuation under disturbances.

Key words: power system stabilizer (PSS); static var compensator (SVC); chaotic mutation based particle swarm optimization (CMPSO); low frequency oscillation