

基于 SDM-Prony 和改进 GWO 算法的多机 PSS 参数最优设计

孙宁杰¹, 王德林¹, 魏久林¹, 康积涛¹, 周鑫², 吴水军³, 和鹏²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;
3. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要: 异步联网后的云南电网动态稳定性问题突出, 考虑到云南电网水轮机组众多的特点, 为了在抑制低频振荡的同时抑制“无功反调”现象, 选用 PSS2B 稳定器进行参数优化整定。针对灰狼算法后期收敛速度慢的缺点, 引入动态权重策略, 平衡全局搜索和局部搜索能力, 提高寻优精度。首先利用 SDM-Prony 对振荡信号进行机电模式辨识, 然后通过改进 GWO 算法迭代寻优最佳 PSS 参数, 最后搭建了云南电网东南地区部分电网。通过两种方式下的时域仿真校验, 验证了优化 PSS2B 参数能够有效地提高系统对振荡的阻尼, 具有一定的鲁棒性和适用性。

关键词: 水轮机组; PSS2B; 参数优化; SDM-Prony; GWO

Optimal design of multi-machine PSS parameters based on SDM-Prony and improved GWO algorithm

SUN Ningjie¹, WANG Delin¹, WEI Jiulin¹, KANG Jitao¹, ZHOU Xin², WU Shuijun³, HE Peng²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Yunnan Power Grid Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China; 3. Yunnan Electric Power Test & Research Institute (Group) Co. Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: The dynamic stability problem of Yunnan power grid after asynchronous networking is serious. Considering the characteristics of the numerous turbines in Yunnan Power Grid, PSS2B stabilizer is used for parameter optimization and setting in order to suppress the phenomenon of “reactive power reverse” while suppressing low frequency oscillation. For the shortcomings of slow convergence of grey wolf algorithm in the late stage, a dynamic weighting strategy is introduced to balance global search and local search capabilities and improve the accuracy of optimization. First, this paper uses SDM-Prony to perform electromechanical mode identification on the oscillation signal. Then it iteratively optimizes the optimal PSS parameters by improving the GWO algorithm. Finally, some power grids in the southeastern region of Yunnan Power Grid are built. Through the time-domain simulation checking in two ways, it is verified that the optimized parameters of PSS2B can effectively improve the damping of the system, and it has certain robustness and applicability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477143) and China Southern Grid Project (No. K-YNKJXM-20160159).

Key words: water turbine; PSS2B; parameter optimization; SDM-Prony; GWO

0 引言

南方电网主网架结构呈现一种“大容量远距离输电、强直弱交、多回直流集中馈入、交直流并联运行”的特征, 使得南方电网存在复杂的安全稳定问题^[1-3]。异步联网后, 云南电网作为网架结构较为

薄弱、负荷水平较低的多直流送端电网, 其频率稳定性、功角稳定性和小扰动稳定性都有变化。引入附加励磁控制(PSS^[4]), 被认为是抑制低频振荡的有效措施。因此, 正确分析低频振荡特性对于 PSS 参数优化以及改善电力系统动态稳定性具有重要意义。

全维特征值分析法(QR)具有鲁棒性好、收敛速度快的优点, 能够求出系统所有的机电模式, 给出的信息全面丰富。但同时 QR 法也存在系统规模、计算量大、内存占用极多等缺点, 上述各缺点可通

过低频振荡降阶分析法(SMA)得到克服与改进。目前, 基于广域测量系统(PMU)的信号分析法, 为从低频振荡中提取模态信息提供了可能。Prony^[5]作为一种常见的模态辨识方法, 被广泛用来分析低频振荡特性。文献[6]提出了一种利用 SDM 方法确定 Prony 阶数的新思路, 该方法受外界噪声影响小, 能在短时间内准确辨识模态信息, 适应性较强。

较之于单机系统, 多机系统存在多个低频振荡模态。因此, 多机电力系统中的 PSS 参数整定涉及全部优化参数的协调配合^[7], 达到整体最佳抑制效果是一个比较复杂的问题。

目前, 全局优化算法应用在 PSS 参数设计中, 其特点是不要求目标函数具有可微与连续性、适应性强, 能在短时间内寻找到最优解。文献[8]采用遗传算法优化 PSS 参数。其算法原理是基于概率的交叉和变异操作寻找最优个体。其优点是通过对变量进行操作, 从而对多个相关变量进行编码, 生成染色体种群, 最后在交叉、变异步骤下迭代搜索寻优最佳参数。但算法程序较为复杂, 且算法性能对初值敏感, 参数选择的不确定性会最终影响算法寻优时间与搜索精度, 无法收敛到全局最优, 具有一定的局限性。文献[9]提出一种基于改进 PSO 算法的协调优化整定 PSS 参数新方法。通过增加主导振荡模式阻尼系数的方式来提高小水电群的送电能力。该算法依据所有微粒在多维空间中随机运动, 每个微粒通过追踪自身极值和全局极值更新自身的位置和速度, 便于寻找最佳解。但算法初始参数较多, 收敛后期随着生物多样性的减少, 算法易陷入局部最优, 寻优精度较低。

灰狼优化算法(Grey Wolf Optimization, GWO)作为一种新的群体智能算法, 具有参数少且易于选取、收敛速度快等优点, 被广泛应用于电力调度^[10]、风险预防、车间管理^[11]等工程实践方面。同时, 灰狼算法也存在着收敛速度慢、全局搜索能力弱的特点, 迭代后期易陷入局部最优。

本文将 SDM-Prony 与改进 GWO 算法相结合用于多机 PSS 参数优化问题。首先搭建了云南电网东南地区部分电网, 用 SDM-Prony 对振荡信号进行主导振荡模式辨识, 得到机电模态信息; 其次建立优化目标函数, 通过改进 GWO 算法迭代寻优最佳 PSS 参数; 最后, 通过非线性时域仿真, 验证了优化 PSS 参数能够有效提高系统的阻尼, 增强了电力系统动态稳定性。

1 SDM-Prony

Prony 算法能对 WAMS 提供的现场实测数据进

行低频振荡模态分析, 通过采样数据估算出振荡信号的幅值、相位、频率、衰减因子。Prony 算法是用复指数函数的线性组合来模拟等间距采样数据, 则输入 $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ 的估计值可以表示为

$$\tilde{x}(k) = \sum_{m=1}^p A_m e^{j\theta_m} e^{(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t}, k = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: p 为拟合阶数; f_m 为频率; α_m 为衰减因子; A_m 为幅值; θ_m 为初相位; Δt 为时间间隔; N 为采样点数。

定义样本函数为

$$r(i, j) = \sum_{k=p_1}^{N-1} x(k-j)x^*(k-i) \quad (2)$$

式中, p_1 为初始阶数, 取为 $[N/2]$, 再利用计算出的 $r(i, j)$ 构造矩阵 $\mathbf{R}$, 本文用 SDM^[6]确定 $\mathbf{R}$ 的有效秩 p , 通过对从大到小排列的奇异值序列取二阶导数值, 取导数值为零的点所对应的位置为定阶数值, 该方法无需人为设置阈值, 抗噪能力强, 在实际中具有一定的适用性。

2 PSS2B 结构

当机械功率发生改变时, 可能会产生比较严重的无功“反调”问题。PSS2B^[12-13]采用转速与电功率双输入信号合成加速功率信号作为输入, 能够在抑制低频振荡的同时解决由于水电机组快速出力变化引起无功功率反调过大的问题。具体拓扑结构如图 1 所示。

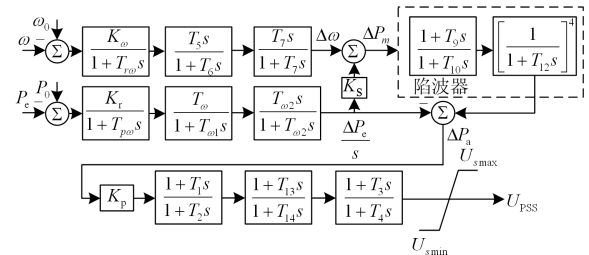


图 1 云南电网 PSS2B 模型

Fig. 1 PSS2B model of Yunnan Power Grid

图中: K_ω 为转速偏差放大倍数; $T_{r\omega}$ 为转速测量时间常数; T_5, T_6, T_7 为转速隔直环节时间常数; K_P, K_s 分别为功率偏差放大倍数和补偿系数; $T_{p\omega}$ 为功率测量时间常数; $T_\omega, T_{\omega1}, T_{\omega2}$ 为功率隔直环节时间常数; T_9, T_{10}, T_{12} 为陷波器环节时间常数; K_P 为 PSS 比例放大倍数; $T_1, T_2, T_{13}, T_{14}, T_3, T_4$ 为超前滞后补偿环节时间常数。

云南电网普遍采用 PSS2B, 其拥有 3 级补偿环节, 且至少采用 2 级超前补偿环节, 可以较好地满足 0.1~3 Hz 频率段的相位要求, 具有较强的补偿灵

活性,但同时过多的补偿环节会带来高频段增益猛增以及低频段抑制能力不足^[14]的问题。由于本文选取的部分区域处于云南电网末端,通过对实际机组的观测可知,区域机组的主导振荡频率约为 0.8 Hz, PSS2B 抑制效果良好。由于本文未考虑调速器影响,即认为机械功率保持不变,可以将陷波器环节忽略,简化模型如图 2 所示。

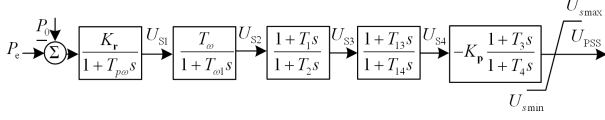


图 2 PSS2B 简化模型

Fig. 2 Simplified model of PSS2B

其中, P_e 为输入电功率, T_1 、 T_2 、 T_{13} 、 T_{14} 、 T_3 、 T_4 为待优化参数。为了保证 PSS2B 的优化效果,本文选取 K_ω 为 1, K_s 为 1, K_r 为 0.92, K_p 为 5, $T_{r\omega}$ 和 $T_{p\omega}$ 为 0.02 s, T_5 、 T_6 、 T_7 为 4 s, T_ω 为 0.48 s, $T_{\omega 1}$ 、 $T_{\omega 2}$ 为 4 s, 陷波器环节 T_9 为 0.6 s, T_{10} 、 T_{12} 为 0.12 s。

3 灰狼优化算法

灰狼算法(GWO)最早是由 Mirjalili 等人于 2014 年提出的一种通过模拟灰狼的社会等级和狩猎行为的新群体智能优化算法,通过狼群跟踪、包围、追捕、攻击等形式实现优化的目的。由于该算法不考虑梯度信息、结构简单、参数设置少、全局搜索能力强,因此在工程中得到广泛的应用。

(1) 社会等级制度。自然界中的灰狼种群按社会地位从高到低划分为 α 、 β 、 δ 和 ϵ ^[15] 4 个等级。为构建灰狼的等级制度模型,定义狼群中的当前最优解为 α 狼,次优解为 β 狼,第三优解为 δ 狼,剩下的解为 ϵ 狼。在 GWO 算法中,狩猎是由 α 狼、 β 狼和 δ 狼负责引导 ϵ 狼进行猎物的跟踪围捕,最终完成狩猎任务。

(2) 狩猎行为。狼群的主要狩猎过程:跟踪、靠近猎物;追赶、骚扰猎物;包围、攻击猎物^[16]。包围数学模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} \bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{D}$ 表示灰狼与猎物间的距离; t 表示迭代次数; $\bar{X}$ 和 $\bar{X}_p(t)$ 表示灰狼和猎物的位置向量; $\bar{A}$ 和 $\bar{C}$ 是参数向量,且 $\bar{A} = 2a \cdot \bar{r}_1 - a$, $\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}_2$, 其中 a 在迭代过程中从 2 线性递减到 0, $\bar{r}_1$ 和 $\bar{r}_2$ 为 [0,1] 的随机向量。

为模拟灰狼的狩猎行为,假设 α 狼、 β 狼和 δ

狼对猎物的位置有更好的了解,因此灰狼群体可利用这三者的位置判断猎物所在的方位。灰狼群体根据 α 狼、 β 狼和 δ 狼的位置信息来更新自身位置的过程如式(4)所示。

$$\begin{cases} \bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha(t) - \bar{A}_1 \cdot \bar{D}_\alpha \\ \bar{X}_2 = \bar{X}_\beta(t) - \bar{A}_2 \cdot \bar{D}_\beta \\ \bar{X}_3 = \bar{X}_\delta(t) - \bar{A}_3 \cdot \bar{D}_\delta \\ \bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \end{cases} \quad (4)$$

3.1 引入动态权重策略

由于灰狼算法的 α 狼不一定是全局最优位置,在后期迭代过程中,随着 ϵ 狼不断地向这三头狼靠近,易陷入局部最优,本文引入了基于步长欧式距离^[17]的比例权重,通过调节权重不断地动态调节算法的全局搜索能力和局部搜索能力,并提高寻优精度。

在灰狼算法中, ϵ 狼集中了 α 狼、 β 狼和 δ 狼的指导来更新自身位置, w_1 对应于 ϵ 狼对 α 狼的学习因子, w_2 对应于 ϵ 狼对 β 狼的学习因子, w_3 对应于 ϵ 狼对 δ 狼的学习因子。本文提出的权重比例计算方法为

$$w_1 = \frac{|X_1|}{|X_1| + |X_2| + |X_3|} \quad (5)$$

$$w_2 = \frac{|X_2|}{|X_1| + |X_2| + |X_3|} \quad (6)$$

$$w_3 = \frac{|X_3|}{|X_1| + |X_2| + |X_3|} \quad (7)$$

ϵ 狼更新自身位置最终公式为

$$\bar{X}(t+1) = w_1 \bar{X}_1 + w_2 \bar{X}_2 + w_3 \bar{X}_3 \quad (8)$$

3.2 优化目标函数

阻尼不足或为负是引起电力系统低频振荡的主要原因,低频振荡阻尼比可表示为

$$\zeta_i = -\frac{\xi_i}{\sqrt{\xi_i^2 + \omega_i^2}} \quad (9)$$

当 $\zeta_i \geq 0.1$ 时,系统阻尼较强;当 $\zeta_i \leq 0.03$ 时,阻尼较弱;当 $\zeta_i \leq 0$, 阻尼变负,系统失稳。

加装 PSS2B 后,整个闭环系统状态矩阵特征根在复平面的位置决定了系统在稳态运行点的稳定情

况。随着迭代的不断进行, 机电模式特征根不断往左复半平面移动, 并尽可能远离虚轴, 使得机电模式阻尼比优化到规定要求。为了提高系统对振荡的阻尼以及优化参数的有效性和鲁棒性, 本文引入了基于阻尼系数的目标函数 f_1 为

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\zeta_{i,j} - \zeta_0| \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

式中: ζ_0 为阈值, 按照阻尼比要求, 设置为 0.2; $\zeta_{i,j}$ 为第 i 个运行方式下第 j 个机电模式的阻尼比, 此处只考虑优化过程中阻尼比低于 0.2 的机电模式; m 为机电模式的数目; n 为运行方式的个数。

PSS 参数优化问题是一个非线性带约束的特征值优化^[18]问题, 具体约束条件为

$$\begin{cases} \min f_1 \\ \text{s.t. } 0.1 \leq T_i \leq 5 \end{cases} \quad (11)$$

其中, T_1 、 T_2 、 T_{13} 、 T_{14} 、 T_3 、 T_4 为补偿环节时间常数。

3.3 算法流程

基于 SDM-Prony 和改进 GWO 算法协调优化 PSS2B 参数的流程如图 3 所示, 具体步骤描述如下。

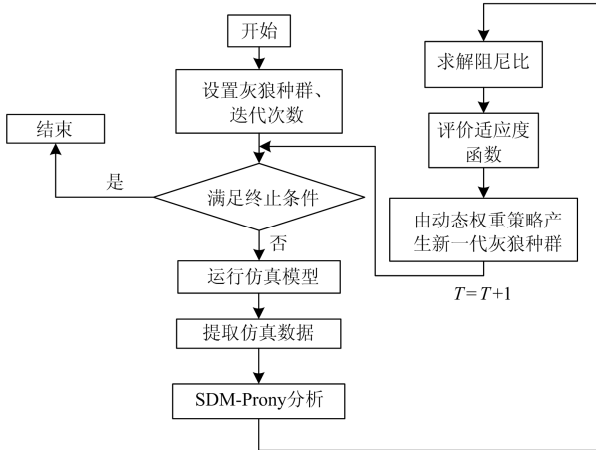


图 3 参数优化流程图

Fig. 3 Parameter optimization flow chart

1) 种群初始化。设置灰狼种群为 50, 迭代次数为 200, 初始化确定每个灰狼个体位置, 确定 α 狼、 β 狼和 δ 狼。

2) 利用 SDM-Prony 辨识低频振荡模式, 求出阻尼比, 并评价适应度函数值。

3) 通过引入动态权重策略并根据式(8), 确定下一代灰狼种群。

4) 依据式(10)确定新一代的 α 狼、 β 狼和 δ 狼。

5) 检查算法是否满足最大迭代次数或者所有微粒均已收敛, 若条件满足则终止迭代, 否则返回步骤 2)。

4 仿真算例

本文以云南电网东南地区部分电网为例, 具体拓扑结构如图 4 所示。水电站 A、水电站 B、水电站 C 以及水电站 D 等值部分构成了类似 4 机 2 区域的仿真系统, 水电站 A 中机组额定容量为 58.8 MVA, 水电站 B 中机组额定容量为 900 MVA, 水电站 C 中机组额定容量为 700 MVA, 水电站 D 中机组额定容量为 117.7 MVA。其中, G1—G4 采用 E'_q 变化的 3 阶实用模型, 且均配置了可控硅励磁调节器的 1 型励磁系统, 负荷采用恒阻抗模型。

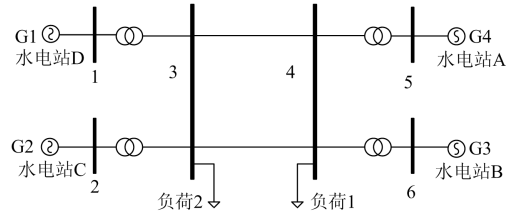


图 4 东南地区部分电网

Fig. 4 Some power grids of southeastern Yunnan

本文采用 3 种典型运行方式, 为了考虑提高优化 PSS 参数在多运行方式下抑制低频振荡的有效性与鲁棒性, 方式 1 选取一种较为严重的运行状态, 区域 1 向区域 2 输送有功功率, 重负荷方式运行(简称重负荷)。方式 2 为断开 3-4 之间一条联络线运行, 同时系统在 1.1 s 时发生 3 相接地短路故障, 1.2 s 时切除故障。方式 3 为轻负荷方式运行(简称轻负荷), 考虑到云南电网异步联网条件下经常发生直流闭锁故障, 导致有功功率过剩, 进而引起系统频率上升, 这时切机能够很好地稳定频率变化。因此本文基于方式 3 设置切机动作, 将发电机 G1 切除 50%, 起始时间为 1 s, 结束时间为 1.5 s。本文基于方式 1 进行多机 PSS 参数协调优化, 基于方式 2 和方式 3 进行动态时域仿真校验。

为了激励系统, 在 G1—G4 发电机励磁电压处设置 5% 的方波阶跃扰动, 开始时间为 2 s, 持续时间 0.5 s, 利用 SDM-Prony 对 G1—G4 的输出电磁功率曲线进行辨识, 找出低频振荡模式。

4 机 2 区域系统存在 3 个低频振荡模式, 根据机电波^[19-20]理论, 本地模式的机电扰动渗透到另一区域后, 幅值发生了衰减, 对 G1 和 G2 功率曲线进行辨识只能得到区域 1 的本地模式以及区间模式, 同理适用于 G3 与 G4。因此, 本文简化为选取 G2 与 G3 的输出有功功率曲线进行模式辨识, 得到不加 PSS2B 时系统在重载方式下的机电模态信息, 具体如表 1 所示。

表 1 不加 PSS 时系统的振荡频率与阻尼比

Table 1 Oscillation frequency and damping ratio without PSS

模式 1	模式 2	模式 3
0.54	0.95	0.99
-0.016	0.094	0.097

由表 1 可以看出, 模式 2 和模式 3 频率较高, 为本地模式, 模式 1 频率较低, 为区间模式。不加 PSS2B 时, 方式 1 下的机电模态存在弱阻尼与负阻尼, 振荡模式 1 的阻尼系数为-0.016, 表明模式 1 为主导低频振荡模式, 此时系统如果受到外界扰动, 会引起增幅振荡、系统失稳, 表明系统在方式 1 下小干扰不稳定。为了抑制低频振荡^[21-22], 提高系统的稳定裕度, 本文在 G2 和 G3 上安装 PSS2B, 每个 PSS2B 有 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_{13} 、 T_{14} 共 6 个参数, 总共 12 个待优化参数。具体优化参数如表 2 所示。

表 2 PSS2B 优化参数

Table 2 Optimization parameters of PSS2B

机组	T_1	T_2	T_3	T_4	T_{13}	T_{14}
G2	0.5	0.12	0.5	0.14	0.23	0.1
G3	0.5	0.36	0.5	0.28	2.1	0.34

从表 2 可以看出, 优化 PSS2B 参数均符合各自上下限要求, 由此可进一步得到加入优化参数以后系统的机电模式振荡频率与阻尼系数, 具体如表 3 所示。

表 3 确加 PSS 时系统的振荡频率与阻尼比

Table 3 Oscillation frequency and damping ratio with PSS

模式 1	模式 2	模式 3
0.32	1.46	1.49
0.421	0.297	0.265

由表 3 看出, 加入 PSS2B 优化参数后, 系统对振荡的阻尼得到了明显提高, 主导振荡模式阻尼比达到 0.421, 达到了阈值规定要求, 系统在方式 1 下的小干扰稳定性显著提高, 说明了优化算法的有效性。考虑到表 2 的优化参数是基于重负荷运行状态下得出的, 因而具有较好的稳定裕度。

云南电网水电站励磁系统附加 PSS 一般采用 IEEE Std421.5TM-2005 规定的 PSS2B 模型。为了进一步验证优化 PSS2B 抑制振荡的效果以及优化参数的鲁棒性和适用性, 本文引入这种常规 PSS2B 作为对比, 并在方式 2 下进行动态时域仿真校验, 分别观察 G3 与 G2 的电磁功率、发电机 G2 与 G1 相对功角、发电机 G3 与 G1 相对功角、发电机 G4 与 G1 相对功角、发电机 G3 与 G2 相对功角曲线, 具体如图 5—图 7 所示。同理基于方式 3 进行时域仿真校验, 分别观察 G1 与 G2 的输出电功率、发电机

G2 与 G1 相对功角、发电机 G3 与 G1 相对功角曲线, 具体如图 8、图 9 所示。

由图 5 可知, 不加 PSS 时, G3 与 G2 的电磁功率曲线发散, 功率在不停地上下振荡, 影响区域间功率传输。由图 6、图 7 可知, δ_{21} 、 δ_{31} 、 δ_{41} 、 δ_{32} 曲线同样处于发散状态, 振荡明显且长时间不消失, 表明系统在方式 2 下失稳。加入常规 PSS2B 后, 振荡的幅值和时间得到了明显抑制, G2 和 G3 的输出功率普遍在 5 s 左右达到了稳态。由 δ_{21} 、 δ_{31} 、 δ_{41} 、 δ_{32} 曲线可知, 功角振荡在 6~9 s 恢复了稳定, 机组之间的转子角振荡同样得到了很好地平息。加入本文优化 PSS2B 后, 较之加入常规 PSS2B, G3 和 G2 功率振荡幅值进一步减小, 同时振荡在 3 s 左右过渡到稳态。功角振荡幅度、次数以及时间得到进一步抑制, 在 4 s 左右振荡停止, 系统在方式 2 下恢复了稳定。表明本文优化 PSS2B 参数抑制效果更佳, 提高了阻尼转矩, 增强了系统动态稳定性。

由图 8、图 9 可知, 不加 PSS 时, 基于方式 3 设置切机动作后, G1 和 G2 输出功率、 δ_{21} 、 δ_{31} 曲线振荡明显, 表征系统在方式 3 下阻尼不足, 系统失稳。加入常规 PSS2B 后, 功率振荡的幅值得到了一定抑制, 但是在 9 s 左右振荡才能平息, 振荡时间较长。功角振荡幅度减小, 但振荡在 10 s 左右才能停止, 且在第 2 s 时振荡幅值反而增加, 表明常规 PSS2B 对抑制方式 3 下的低频振荡整体效果不

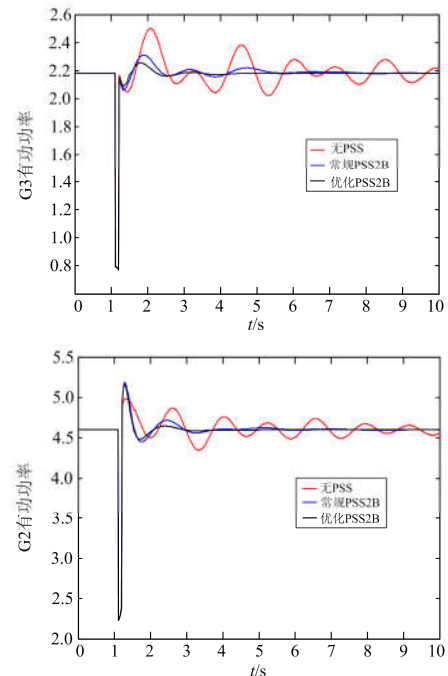


图 5 方式 2 下加入 PSS 前后 G3、G2 输出电磁功率曲线

Fig. 5 G3 and G2 output electromagnetic power curves before and after adding PSS in mode 2

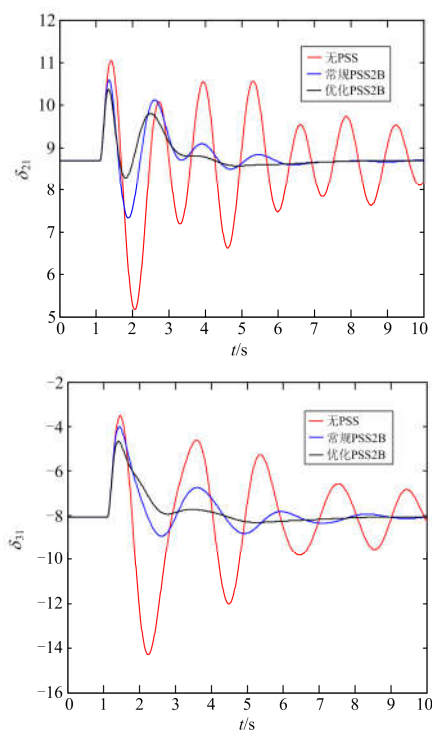


图 6 方式 2 下加入 PSS 前后 G2 与 G1、G3 与 G1
相对功角曲线

Fig. 6 Relative power angle curves of G2 and G1, G3 and G1 before and after adding PSS in mode 2

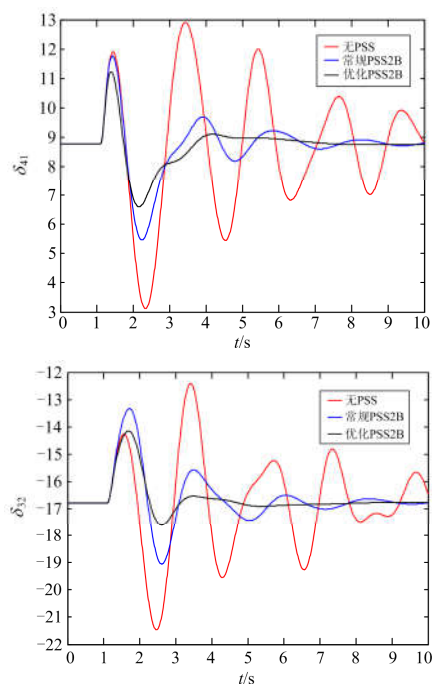


图 7 方式 2 下加入 PSS 前后 G4 与 G1、G3 与 G2
相对功角曲线

Fig. 7 Relative power angle curves of G4 and G1, G3 and G2 before and after adding PSS in mode 2

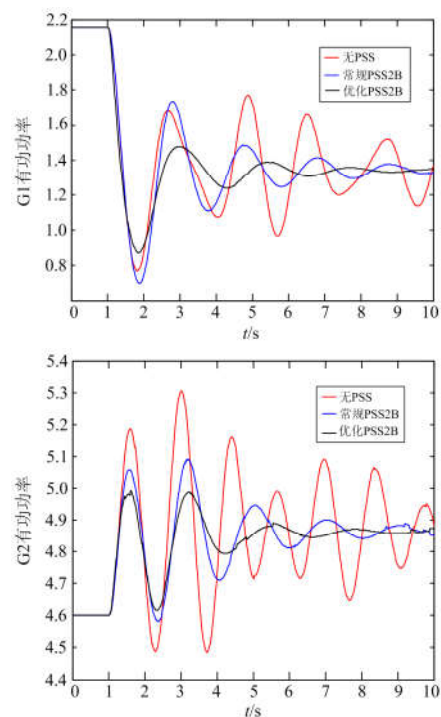


图 8 方式 3 下加入 PSS 前后 G1、G2 输出电磁功率曲线

Fig. 8 G1 and G2 output electromagnetic power curves before and after adding PSS in mode 3

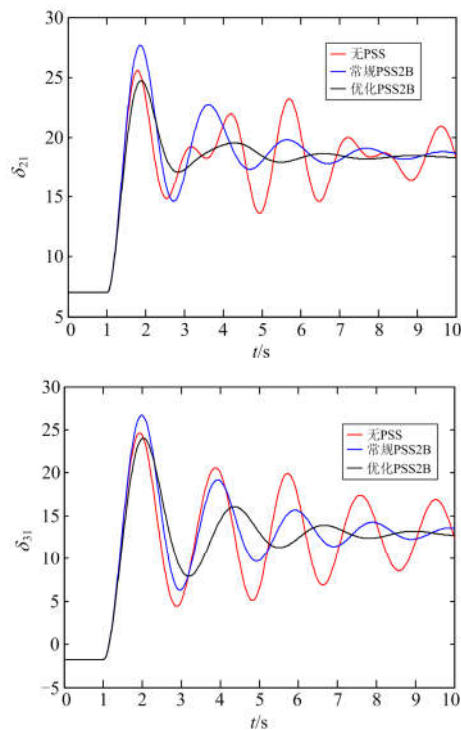


图 9 方式 3 下加入 PSS 前后 G2 与 G1、G3 与 G1
相对功角曲线

Fig. 9 Relative power angle curves of G2 and G1, G3 and G1 before and after adding PSS in mode 3

佳。较之常规 PSS2B, 加入本文优化 PSS2B 后, 抑制 G1 和 G2 功率振荡效果明显, 7 s 左右振荡平息, 功角振荡也在 7~8 s 恢复了稳定, 表明本文优化的 PSS2B 能够明显增加系统在方式 3 下的阻尼, 增强了小干扰稳定性。

5 结论

本文将 SDM-Prony 与改进 GWO 算法相结合用于多机电力系统稳定器参数优化, 得出结论如下。

(1) 本文基于方式 1 通过改进 GWO 算法迭代寻优最佳 PSS 参数。方式 1 加入优化 PSS2B 参数后, 3 种振荡模式阻尼比最小值为 0.265, 同时主导振荡模式阻尼提高到了 0.421, 加入 PSS 起到了提高系统阻尼转矩的作用。

(2) 进一步通过动态时域仿真校验了基于方式 1 确定的优化参数, 在方式 2 和方式 3 下也能较好地抑制低频振荡, 由于方式 1 为重负荷运行状态, 说明本文优化出的 PSS2B 参数具有一定的稳定裕度和适用性, 能够有效提升系统对振荡的阻尼。

参考文献

- [1] 蔡葆锐, 王兴刚, 司大军. 异步联网对云南电网安全稳定性的影响[J]. 云南电力技术, 2015, 43(1): 83-86.
CAI Baorui, WANG Xinggang, SI Dajun. Effect of asynchronous networking on security and stability of Yunnan Power Grid[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2015, 43(1): 83-86.
- [2] 杜斌, 张丹, 张军民, 等. 异步联网后云南电网的稳定特性与控制措施[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 13-16, 23.
DU Bin, ZHANG Dan, ZHANG Junmin, et al. Stability characteristics and control measures of Yunnan Power Grid after asynchronous networking[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 13-16, 23.
- [3] 彭俊春, 周懋文. 异步联网后电网频率稳定影响因素研究[J]. 云南电力技术, 2017, 45(2): 107-109.
PENG Junchun, ZHOU Maowen. Research on the influencing factors of grid frequency stability after asynchronous networking[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2017, 45(2): 107-109.
- [4] 沈利平, 付廷勤, 王茂元. PSS 模型比较、反调试验及现场应用[J]. 水电厂自动化, 2009, 30(2): 14-17.
SHEN Liping, FU Tingqin, WANG Maoyuan. PSS model comparison, anti-regulation test and field application[J]. Automation of Hydroelectric Power, 2009, 30(2): 14-17.
- [5] 郭成, 李群湛, 王德林. 基于 Prony 和改进 PSO 算法的多机 PSS 参数优化[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 16-21.
GUO Cheng, LI Qunzhan, WANG Delin. Multi-machine PSS parameter optimization based on Prony and improved PSO algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 16-21.
- [6] 张程, 金涛. 基于 ISPM 和 SDM-Prony 算法的电力系统低频振荡模式辨识[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1209-1216.
ZHANG Cheng, JIN Tao. Low-frequency oscillation identification of power system based on ISPM and SDM-Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1209-1216.
- [7] 牛振勇. 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 Zhenyong. Optimization of PSS parameters for multi-machine systems based on evolution strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27.
- [8] ABIDO M A. Parameter optimization of multi machine power system stabilizers using genetic local search[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(8): 785-794.
- [9] 刘蔚. 一种提高多小水电群送出能力的 PSS 参数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 44-49.
LIU Wei. A coordinated optimization method for PSS parameters to improve the delivery capacity of multiple small hydropower groups[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 44-49.
- [10] 张子泳, 仇梦林, 李莎. 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 1-10.
ZHANG Ziyong, ZHANG Menglin, LI Sha. Research on environmental economic dispatch of power system based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 1-10.
- [11] SULAIMAN M H, MUSTAFFA Z, MOHAMED M R, et al. Using the grey wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem[J]. Applied Soft Computing, 2015, 32(6): 286-292.
- [12] 刘子全, 高磊, 赵娴, 等. 一种可有效提高临界增益的改进型电力系统稳定器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1875-1881.
LIU Ziquan, GAO Lei, ZHAO Xian, et al. An improved power system stabilizer that can effectively improve the critical gain[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1875-1881.
- [13] 李莹. PSS2A 中加速功率合成环节的原理分析及现场参数整定原则[C] // 2013 年中国电机工程学会年会论文集, 中国电机工程学会, 2013: 5.
LI Ying. Principle analysis of acceleration power

- synthesis in PSS2A and principles of field parameter tuning[C] // Proceedings of the 2013 Annual Meeting of the Chinese Society for Electrical Engineering, Chinese Society of Electromechanical Engineering, 2013: 5.
- [14] 吴跨宇, 卢岑岑, 吴龙, 等. 一种新型双信号电力系统稳定器及其仿真研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1462-1468.
- WU Kuayu, LU Cencen, WU Long, et al. A novel dual-signal power system stabilizer and its simulation study[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1462-1468.
- [15] PILOT M, BRANICKI W, JEDRZEJEWSKI W, et al. Phylogeographic history of grey wolves in Europe[J]. BMC Evolutionary Biology, 2010, 10(1685): 1-11.
- [16] MURO C, ESCOBEDO R, SPECTOR L, et al. Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations[J]. Behavioural Processes, 2011, 88(3): 192-197.
- [17] 郭振洲, 刘然, 拱长青, 等. 基于灰狼算法的改进研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3603-3606, 3610.
- GUO Zhenzhou, LIU Ran, GONG Changqing, et al. Improved research based on grey wolf algorithm[J]. Research of Computers, 2017, 34(12): 3603-3606, 3610.
- [18] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
- LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on multi-objective optimal power flow problem based on artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [19] 王德林, 王晓茹. 电力系统中机电扰动的传播特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 18-24.
- WANG Delin, WANG Xiaoru. Analysis of propagation characteristics of electromechanical disturbance in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 18-24.
- [20] 王德林, 王晓茹. 不均匀连续体电力系统中的机电波传播[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 78-85.
- WANG Delin, WANG Xiaoru. Electromechanical wave propagation in non-uniform continuum power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 78-85.
- [21] 李林, 宋宗勋, 李峰, 等. 抑制区域间低频振荡的 UPFC 模糊滑膜控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 104-109.
- LI Lin, SONG Zongxun, LI Feng, et al. UPFC fuzzy synovial controller for suppressing inter-region low frequency oscillations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 104-109.
- [22] 李生虎, 孙琪, 石雪梅, 等. 基于区域极点配置的风电系统弱阻尼低频振荡模式抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 14-20.
- LI Shenghu, SUN Qi, SHI Xuemei, et al. Suppression of low-damping low-frequency oscillation mode for wind power system based on regional pole assignment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 14-20.

收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-07-24

作者简介:

孙宁杰(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、低频振荡、PSS 优化; E-mail: 1210874855@qq.com

王德林(1970—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统机电动态、扰动传播、频率稳定与控制、连续体建模等; E-mail: dlwang@swjtu.cn

魏久林(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及逆变并网技术、滑模变结构控制。E-mail: 2057232879@qq.com

(编辑 许威)