

一种提高多小水电群送出能力的 PSS 参数协调优化方法

刘蔚¹, 赵勇¹, 吴琛², 李玲芳²

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 提出了一种基于粒子群算法的 PSS 参数协调优化方法, 通过增加主导低频振荡模式阻尼比的方式来提高小水电群的送出能力。所提方法首先计算出影响各小水电群送出能力的主导低频振荡模式。然后利用留数指标来筛选出参与 PSS 参数协调优化的机组, 留数指标能够综合反映出机组参与主导低频振荡模式的可控性及可观性程度。最后提出了改进的 PSO 搜索策略以提高粒子群寻优的效率。将该方法应用到云南电网滇西地区的保山、怒江和迪庆三个小水电群中, 以提高滇西地区小水电群的整体送出能力。计算结果表明提出的方法是可行和有效的。

关键词: 小水电群; 粒子群; PSS; 可控性; 可观性; 留数

A method of PSS parameters coordinated optimization for the improvement of transmission capacities of multiple small hydropower station groups

LIU Wei¹, ZHAO Yong¹, WU Chen², LI Lingfang²

(1. China Southern Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China; 2. Yunnan Electric Power Dispatching & Control Center, Kunming 650011, China)

Abstract: A PSS parameters coordinated optimization algorithm based on PSO is proposed which improves the transmission capacities of multiple small hydropower station groups by increasing damping ratio of critical low frequency oscillation modes. Firstly, critical low frequency oscillation modes which influence the transmission capacities of small hydropower station groups are calculated. Then generators that participate in the PSS parameters optimization are selected based on the residue index which can comprehensively reflect the controllability and the observability of generators that involved in the critical low frequency oscillation mode. Lastly, the modified searching strategy is proposed to improve the efficiency of the PSO optimization searching. The proposed method is applied in Baoshan, Nujiang and Diqing small hydropower station groups in Dianxi area of Yunnan Power Grid to improve the total transmission capacity in Dianxi area. Simulation results show that the proposed method is feasible and effective.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050205).

Key words: small hydropower station group; PSO; PSS; controllability; observability; residue

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0044-07

0 引言

我国小水电资源十分丰富, 且主要分布在西部地区。小水电富集地区的电能送出主要采用辐射状接线从低电压等级逐步向高电压等级汇集方式, 形成多个小水电群汇集后送出的情况。由于远离负荷中心与电网联系薄弱, 小水电群的送出能力主要受到动态稳定问题的制约。

电力系统稳定器(PSS)是被广泛用来抑制地区性和区域间低频振荡的一种附加励磁控制器^[1], 合

理配置 PSS 参数可以有效增加电力系统机电模式阻尼, 对于提高电力系统的稳定性具有重要的意义。对 PSS 参数进行优化的各种方法主要有遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、混沌算法灵敏度指标方法、广域阻尼控制等^[2-10]。

多个小水电群集中送出时, 机组可能会参与多个不同的振荡模式, 传统的 PSS 参数一般只针对机组对区域电网的振荡设计, 具有一定局限性。

为了提高小水电群送出能力, 本文提出了一种基于粒子群算法的提高小水电群送出能力的 PSS 参数协调优化方法。该方法首先计算影响小水电群送出能力的主导低频振荡模式, 然后利用能够综合反

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2012AA050205)

映机组参与主导低频振荡模式的可控性及可观性的留数指标筛选出参与 PSS 参数协调优化的机组, 最后利用改进的搜索策略进行粒子群寻优。以云南电网滇西地区的保山、怒江和迪庆小水电群送出为仿真算例, 验证提出的方法的有效性。

1 低频振荡模式的留数指标^[11-14]

设电力系统中用于小干扰稳定分析的稳态运行点附近的线性化模型为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (1)$$

其中: X 为 n 维状态向量; Y 为 m 维输出向量; U 为 r 维输入向量; A 为系统状态矩阵; B 为控制矩阵; C 为输出矩阵。

设系统状态矩阵 A 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 对应左、右特征向量矩阵为 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]$ 和 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$, 式(1)可以进一步表示为

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + B'U \\ Y = C'Z \end{cases} \quad (2)$$

其中: $X = \Phi Z$, $\Psi^T \Phi = I$, $A = \Psi^T A \Phi$ 是特征根对角矩阵, 对角元素为特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$; $B' = \Psi^T B$ 为模式能控性矩阵, B' 中的元素 $b'_{ik} = \psi_i^T B_k$ 的模反映了输入量 u_k 对模式 i 的能控度; $C' = C \Phi$ 为模式能观性矩阵, C' 中的元素 $c'_{ki} = C_k \phi_i$ 的模反映了输入量 y_k 对模式 i 的能观度。

式(2)中的输入 Y 和输出 U 用传递函数矩阵的形式可以表示为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C \Phi (SI - A)^{-1} \Psi^T B \quad (3)$$

由于 A 是特征根对角矩阵, 其对角元素为特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 因此传递函数矩阵的元素可以进一步表示为

$$G_{ij}(s) = \frac{Y_i(s)}{U_j(s)} = \sum_{k=1}^n \frac{C_i \phi_k \psi_k^T B_j}{s - \lambda_k} = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{s - \lambda_k} \quad (4)$$

其中, $R_k = C_i \phi_k \psi_k^T B_j$ 是输出和输入对模态 k 的留数, 它是能控性和能观性的乘积, 因此既表征了输出对模态 k 的能观性, 又表征了输入对模态 k 的能控性。

2 粒子群算法

粒子群算法是 Kennedy 等^[15]在 1995 年提出的一种基于群体智能理论的演化计算技术。它是对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟。更确切地说是对简单个体组成的群落与环境以及个体之间的互动

行为的模拟。

粒子群算法中, 粒子的位置代表优化问题的解, 每个粒子由一个速度决定其飞行方向和速率, 每个粒子的优劣取决于目标函数确定的适应值。假设在一个 D 维的目标搜索空间里, 粒子群算法随机初始化一个由 m 个粒子组成的群体, 其中第 i 个粒子表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 飞行速度表示为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。粒子跟踪两个极值在解空间中搜索: 第 1 个极值是粒子本身所找到的最优解, 即个体极值, 记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$; 第 2 个极值是群体搜索到的最优解, 即全局极值, 记为 $P_{gi} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。在第 $k+1$ 次迭代中, 粒子 i 根据式(5)、式(6)更新速度和位置。

$$V_{id}^{k+1} = W V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (5)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (6)$$

式中: r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数; c_1 和 c_2 为加速因子, 用来调节每次迭代的步长; W 为惯性因子; k 为迭代次数。

式(1)的第 1 部分是粒子的惯性行为, 表示了粒子先前速度的惯性, 反映了粒子的记忆能力; 第 2 部分是粒子的认知行为, 表示了粒子吸取自身经验的过程, 反映了粒子的思考能力; 第 3 部分是粒子的社会行为, 表示了粒子学习群体经验的过程, 反映了粒子间的信息共享和合作。为避免收敛过快或过慢, 一般还规定了粒子飞行速度上下限 v_{\max} 和 v_{\min} 。

3 基于粒子群的 PSS 参数优化

3.1 优化目标

合理配置 PSS 参数可以有效增加电力系统机电模式阻尼, 从而提高小水电群送出能力。因此定义使影响小水电群送出能力的若干主导低频振荡模式的阻尼比最大化作为优化目标。

机组 PSS 主要由增益和 1~2 个超前-滞后环节组成, 即 $K \times \frac{1+T_1S}{1+T_2S} \times \frac{1+T_3S}{1+T_4S}$, 其中 K 是 PSS 增益, $T_1 \sim T_4$ 是超前-滞后环节的时间常数。

优化目标函数可以描述为

$$\begin{cases} \max J = \sum_i^N \zeta_i \\ \text{s.t. } \zeta_{i0} \leq \zeta_i, i=1, 2, \dots, N \\ \zeta_{k0} \leq \zeta_k, k=1, 2, \dots, M \\ K_{i\min} \leq K_i \leq K_{i\max} \\ T_{li\min} \leq T_{li} \leq T_{li\max} \\ T_{3i\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中: ξ_i 是影响小水电群送出的主导低频振荡模式的阻尼比; ξ_k 是其他主导低频振荡模式的阻尼比; ξ_{i0} 和 ξ_{k0} 是阻尼比原始值; K_i , T_{1i} 和 T_{3i} 是第 i 台机组的待优化参数。

3.2 参与 PSS 优化机组的筛选

由于小水电群内的机组众多, 如果对所有安装 PSS 装置的机组进行优化计算量很大。因此可以根据机组参与主导振荡模式的程度进行排序, 选择其中影响大的机组进行 PSS 参数优化。

一般的方法是利用参与因子进行机组的筛选。

参与因子可以表示为 $p_{ki} = \phi_{ki} \times \psi_{ik}^{[1]}$, 表示模式 i 中第 k 个状态变量的相对参与程度。PSS 在抑制低频振荡时, 主要关注的状态变量是发电机转子角频率 ω 。可以选择 ω 对主导振荡模式有较大参与因子的机组参与 PSS 优化。

由于机组 PSS 装置的输入是机组的 ω 和 P_G , 输出量 V_{PSS} 叠加在机组的励磁系统输入端, 从模式的可控性和可观性角度, 利用机组 ω 对模式的可观性以及 PSS 输出对模式的可控性的留数指标, 分析机组对主导振荡模式的参与程度, 可以取得更好的效果。因此本文采用以上留数指标作为筛选参与 PSS 优化机组的依据。

3.3 改进的寻优策略

优化目标要求机组 PSS 参数优化结果要满足主导振荡模式阻尼比大于等于其原始值的约束条件。而在粒子群寻优过程中, 由于一些机组可能参与多个主导振荡模式, 因此其 PSS 参数可能会使一些主导振荡模式阻尼比增大, 而导致另一些主导振荡模式阻尼比小于其原始值的情况, 从而导致大量不可行解出现。

如果在寻优过程中仅利用可行解来寻找全局最优解, 而不考虑不可行解在粒子群飞行中的引导作用, 可能会降低搜索效率。而且在可行域占搜索空间比例很小或最优解位于边界附近情况下, 一些不可行解可能更接近全局最优解, 包含更多有用信息, 如果利用不可行解的信息来引导粒子群飞行, 有利于寻找全局最优解。为此本文提出一种改进的搜索策略。

设违反约束度函数为 $g = \sum_{i=1}^H (\xi_{i0} - \xi_i)$, 其中 ξ_i 是满足 $\xi_{i0} \geq \xi_i$ 的主导低频振荡模式。

设容忍度阈值为 $\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{M_{\text{gen}} - k_{\text{gen}}}{M_{\text{gen}}}$, 其中: ε_0 是初始值; k_{gen} 是当前迭代次数; M_{gen} 是最大迭代次数。

改进的策略为: 粒子群找到的个体或全局极值, 虽然不满足约束条件, 但只要在容许范围内, 即满足 $g \leq \varepsilon$ 的条件, 仍可以作为个体极值或全局极值参与式(5)、式(6)的速度和位置更新。

该策略可以使寻优过程在迭代的初期, 允许一些满足容忍度阈值的不可行解提供信息给粒子群, 随着迭代进行, 容忍度阈值不断减小, 对可行解的要求越来越高, 有利于粒子群在可行解的指引下寻优。

3.4 算法流程

1) 随机初始化粒子群位置, 计算目标函数作为各粒子的适应度函数, 并作为各粒子初始个体极值, 将其中最小值作为群体初始全局极值。

2) 判断迭代次数是否达到最大迭代次数, 若是则输出群体当前的全局极值作为最优解, 若否则继续进行迭代计算。

3) 由式(5)计算各粒子的速度, 由式(6)更新各粒子的位置。

4) 计算各粒子在新位置的适应度函数, 按照改进策略更新各粒子的个体极值和全局极值, 转到步骤 2)。

4 算例分析

4.1 云南滇西小水电群算例

本节以云南电网滇西地区的保山、怒江和迪庆三个小水电群送出为算例进行 PSS 参数协调优化。滇西保山、怒江和迪庆小水电群的网络结构见图 1, 各小水电群装机概况见表 1。

表 1 保山、怒江和迪庆小水电群概况表

Table 1 Profile of Baoshan, Nujiang and Diqing small hydropower station groups

小水电群名称	电站数	装机台数	装机容量/MW
保山小水电群	27	75	1 284
怒江小水电群	56	132	1 273
迪庆小水电群	46	95	1 382

各小水电群送出先通过 10 kV、35 kV 和 110 kV 网络逐步汇集到 220 kV 变电站, 然后再上送到 550 kV 主网。

4.1.1 确定主导振荡模式

根据计算得到制约保山、怒江和迪庆小水电群送出的 220 kV 断面及其最大送出能力, 以及对主导低频振荡模式的频率和阻尼(见表 2)。

4.1.2 参与 PSS 优化机组的筛选

参与各主导低频振荡模式的主要发电机组及其可控性、可观性和留数指标见表 3。

表 2 制约保山、怒江和迪庆小水电群送出能力的主导低频振荡模式表

Table 2 Critical low frequency oscillation modes limiting the transmission capacities of Baoshan, Nujiang and Diqing small hydropower station group

主导振荡模式	振荡频率/Hz	阻尼比/%	送出能力/MW
保山与景洪, 普洱及德宏机组间的振荡	0.687	7.8	420
怒江与保山, 小湾及金安桥机组间的振荡	0.851	10.5	340
迪庆与阿海、怒江机组间的振荡	0.971	7.4	380

从表 3 可以看出, 如果按照参与因子作为筛选指标, 小湾和金安桥机组应该参与优化。而小湾和金安桥机组的留数指标很小, 观察可控性和可观性指标, 可以看出小湾和金安桥机组对怒江振荡模式的可观性很小, 主要是由于小水电群送出的低频振荡模式属于地区低频振荡, 一般表现为地区小水电群之间或小水电群与主网机组的振荡, 而小湾和金安桥机组属于主网侧的机组, 对地区低频振荡的可观性较小。进一步通过仿真计算, 也发现小湾和金安桥机组 PSS 参数对怒江振荡模式的阻尼影响很小。表明利用留数指标进行机组筛选比利用参与因

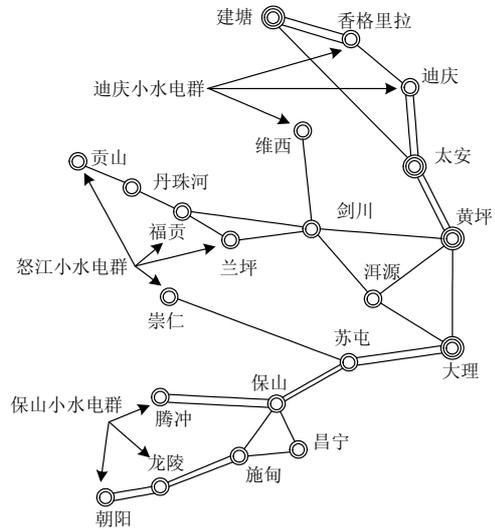


图 1 云南滇西保山、怒江和迪庆小水电群网络示意图
Fig. 1 Network of Yunnan Dianxi Baoshan, Nujiang and Diqing small hydropower station groups

子更有效一些。

按照参与各主导低频振荡模式的发电机组的留数指标的大小, 选出 12 个电厂参与 PSS 参数优化, 机组名称及其参与主导振荡模式的情况见表 4。

表 3 参与各主导低频振荡模式的机组表

Table 3 Generators participating in critical low frequency oscillation modes

怒江振荡模式					迪庆振荡模式					保山振荡模式				
电厂名称	参与因子	可控性指标	可观性指标	留数指标	电厂名称	参与因子	可控性指标	可观性指标	留数指标	电厂名称	参与因子	可控性指标	可观性指标	留数指标
阿海	0.7123	0.6	0.135	0.0810	阿海	0.0035	0.547	0.576	0.3151	糯扎渡	0.6969	0.437	0.314	0.1372
迪麻洛	0.2365	0.071	0.305	0.0217	毛坡	0.8146	0.161	0.266	0.0428	景洪	0.7684	0.314	0.278	0.0873
阿鸠田	0.035	0.076	0.268	0.0204	觉傈罗	0.0075	0.134	0.184	0.0247	阿鸠田	0.0976	0.096	0.195	0.0187
腾龙一	0.043	0.047	0.345	0.0162	古泉河	0.0189	0.118	0.126	0.0149	大盈四	0.1322	0.155	0.12	0.0186
腾龙二	0.083	0.081	0.16	0.0130	良美河	0.103	0.023	0.407	0.0094	腾龙一	0.0981	0.056	0.243	0.0136
傈马河	0.2131	0.081	0.126	0.0102	仕旺河	0.38	0.106	0.067	0.0071	弄另	0.1108	0.081	0.143	0.0116
腊寨	0.044	0.116	0.071	0.0082	龙开口	0.0015	0.103	0.065	0.0067	腾龙二	0.1249	0.094	0.099	0.0093
觉傈罗	0.2358	0.057	0.13	0.0074	鲁地拉	0.0021	0.097	0.049	0.0048	架弩河	0.0939	0.054	0.144	0.0078
小湾	0.321	0.171	0.04	0.0068	格登	0.462	0.113	0.04	0.0045	阿海	0.0154	0.188	0.032	0.0060
施底河	0.1681	0.062	0.104	0.0064	吉仁河	0.5652	0.134	0.031	0.0042	腊寨	0.0946	0.138	0.041	0.0057
春多乐	0.2376	0.044	0.128	0.0056	麦地河	0.3798	0.099	0.04	0.0040	等壳	0.0739	0.122	0.037	0.0045
茨中	0.236	0.044	0.127	0.0056	兴隆河	0.2867	0.062	0.061	0.0038	苏家河	0.0597	0.124	0.033	0.0041
金安桥	0.756	0.133	0.035	0.0047	施坝河	0.5938	0.143	0.026	0.0037	松山河	0.0681	0.088	0.043	0.0038
漫湾	0.0279	0.15	0.018	0.0027	汝柯河	0.4613	0.096	0.036	0.0035	龙江	0.0859	0.013	0.145	0.0019
老安统	0.2173	0.06	0.039	0.0023	相多河	0.2368	0.064	0.027	0.0017	大勐统	0.0635	0.015	0.094	0.0014

表 4 参与 PSS 优化的机组表

Table 4 Generators participating in the PSS optimization

机组名称	分组
毛坡, 良美河, 迪麻洛,	参与单个主导振荡模式的机组
古泉河, 景洪, 糯扎渡, 大盈四	
腾龙一, 腾龙二, 阿鸠田, 觉傣罗, 阿海	参与多个主导振荡模式的机组

4.1.3 基于粒子群的 PSS 参数优化结果及分析

采用粒子群算法对机组 PSS 参数进行优化计算。设定粒子群规模为 30, 加速因子 $c_1=c_2=2.0$, 容忍度阈值初值 $\epsilon_0 = 0.1$, 最大迭代次数 50。

优化结果见表 5。作为对比, 表 4 中给出了表 2 中所有机组都参与 PSS 参数优化的计算结果。可以看出, 各小水电群的送出能力均有不同程度提高。全部电厂参与 PSS 参数优化结果与 12 个电厂的优化结果接近, 表明其余电厂机组对结果影响不大, 利用留数指标筛选主要机组进行优化就可以达到很好的优化效果。

表 5 PSS 参数优化结果表

Table 5 Results of PSS parameters optimization

主导 振荡模式	优化前		优化后 (12 个电厂)		优化后 (全部电厂)	
	阻尼 比/%	送出能 力/MW	阻尼 比/%	送出能 力/MW	阻尼 比/%	送出能 力/MW
保山	7.8	420	8.9	450	9.1	450
怒江	10.5	340	13.1	400	13.2	400
迪庆	7.4	380	9.2	420	9.3	420

为验证粒子群改进寻优策略的有效性, 将改进后的算法与常规粒子群算法进行了对比, 结果见表 6。结果表明, 改进算法有更好的寻优效率。

表 6 改进策略效果对比表

Table 6 Comparison of modified strategy results

算法名称	计算次数	得到最优解 的次数	最优解 出现代数
本文算法	50	43	8~20
常规粒子群算法	50	31	10~37

根据优化结果, 还发现同时参与怒江和迪庆振荡模式的觉傣罗和阿海机组的 PSS 参数变化很小, 进一步计算分析表明调整觉傣罗和阿海机组 PSS 参数, 会增加怒江振荡模式阻尼而减少迪庆振荡模式阻尼, 或反之。表明一些参与多个主导振荡模式的机组的 PSS 参数优化有时很难兼顾不同振荡模式的需求。

4.2 新英格兰 10 机 39 节点系统

为了与近年来较新研究成果进行对比分析, 本节以新英格兰 10 机 39 节点系统为算例, 与文献[5]的方法和结果进行对比分析。

文献[5]提出了基于阻尼灵敏度指标的 PSS 参数优化方法, 该方法先通过阻尼比灵敏度指标来选取机电模式下的强相关参数, 然后再采用自适应遗传算法(AGA)对选取出来的 PSS 参数进行优化。本文提出的方法是先利用留数指标来筛选出参与 PSS 参数优化的机组, 再采用改进的粒子群算法进行 PSS 参数优化。两种方法思路近似但具体实现方法不同。

新英格兰 10 机 39 节点系统有 G1~G10 共 10 台机组, 代表美国-加拿大互联系统的等值机, 为了提高系统对振荡模态的阻尼, 在 G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8 和 G9 机组上加装 PSS。

文献[5]根据阻尼比灵敏度指标筛选出的待优化参数以及根据本文留数指标筛选出的待优化机组参数见表 7。可以看出, 文献[5]利用阻尼比灵敏度指标方法选择对 G1~G9 的部分参数进行优化。本文利用留数指标选择方法 G2, G3, G4, G6, G7, G8 和 G9 的参数进行优化, 认为机组 G1 和 G4 留数较小, 可以不参与优化。

表 7 筛选出的机组对比表

Table 7 Comparison of generators selected

文献[5]方法	本文方法
G1(T11)	
G2(T12)	G2(K2, T12, T32)
G3(T13)	G3(K3, T13, T33)
G4(T14)	
G6(T16)	G6(K6, T16, T36)
G7(T37)	G7(K7, T17, T37)
G8(T18, T38)	G8(K8, T18, T38)
G9(T19, T39)	G9(K9, T19, T39)

注: Ki, Tii 含义参见公式(7)说明

采用粒子群算法对以上 PSS 参数进行优化。其中设定粒子群规模 30, 加速因子 $c_1=c_2=2.0$, 容忍度阈值初值 $\epsilon_0 = 0.1$, 最大迭代次数 50 次。经过 30 次随机优化计算, 取其中的最优值作为优化结果。

文献[5]和本文方法求得优化参数后的振荡模式及其阻尼比参见表 8。可以看出, 本文方法优于参与优化的参数较多, 因此对大部分阻尼比有提高且结果优于文献[5], 但由于未对 G1 和 G4 机组的 PSS 参数做优化, 因此部分阻尼比低于文献[5]结果。

综上所述, 两种方法各有特色, 文献[5]方法着重于筛选出机组的关键参数进行优化, 本文方法着重于筛选出关键机组进行参数优化, 两种方法都可

以作为 PSS 参数优化的参考。

表 8 优化后振荡模式对比表

Table 8 Comparison of oscillation modes after optimization

文献[5]方法		本文方法		
特征值	阻尼比	特征值	阻尼比	阻尼比差
-0.5945±j7.2673	8.15%	-0.575±6.521	8.78%	0.63%
-0.6699±j7.8076	8.55%	-0.687±7.299	9.37%	0.82%
-0.6027±j7.9001	7.61%	-0.746±7.993	9.29%	1.68%
-0.4546±j6.4195	7.60%	-0.477±6.23	7.63%	0.03%
-0.4971±j6.3590	7.79%	-0.443±6.076	7.27%	-0.52%
-0.5619±j5.5296	10.11%	-0.583±4.835	12.00%	1.89%
-0.7216±j6.0576	11.83%	-0.714±5.394	13.10%	1.27%
-0.4040±j5.2941	7.61%	-0.345±4.059	8.50%	0.89%
-0.3055±j4.1607	7.32%	-0.281±4.022	6.97%	-0.35%

5 结论

本文提出了一种基于粒子群算法的提高小水电群送出能力的 PSS 参数协调优化方法。该方法利用能够综合反映机组参与主导低频振荡模式的可控性及可观性的留数指标筛选出参与 PSS 参数协调优化的机组, 与通过参与因子进行筛选相比具有更好的效果。提出的改进搜索策略, 通过允许满足容忍度阈值的不可行解提供信息给粒子群来提高寻优效率。云南电网滇西地区保山、怒江和迪庆小水电群送出的仿真结果表明提出的方法是可行和有效的。

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.
- [2] 石辉, 张勇军, 徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 242-247.
SHI Hui, ZHANG Yongjun, XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.
- [3] 李奇, 陈维荣, 段涛, 等. 基于随机聚焦粒子群算法的多机系统 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 13-18.
LI Qi, CHEN Weirong, DUAN Tao, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers based on stochastic focusing particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 13-18.
- [4] 吴峰, 陈维荣, 李奇, 等. 基于粒子群优化算法的 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 53-58.
WU Feng, CHEN Weirong, LI Qi, et al. Parameter optimization of power system stabilizer on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 53-58.
- [5] 尹波, 庞松龄, 杨眉. 基于阻尼灵敏度指标的 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 28-32.
YIN Bo, PANG Songling, YANG Mei. Optimization of PSS parameters based on damping sensitivity indices[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 28-32.
- [6] 赵艺, 陆超, 柳勇军, 等. 基于辨识和留数的发电机广域附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 1-6.
ZHAO Yi, LU Chao, LIU Yongjun, et al. Wide-area generator supplementary damping controller design based on residue and identification methods[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 1-6.
- [7] 郭成, 李群湛. 基于改进 PSO 算法的 SSSC 广域阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 151-158.
GUO Cheng, LI Qunzhan. SSSC wide-area damping controller design based on improved particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 151-158.
- [8] 郑希云, 李兴源, 王渝红. 基于混沌优化算法的 PSS 和直流调制的协调优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 170-175.
ZHENG Xiyun, LI Xingyuan, WANG Yuhong. Coordination and optimization of PSS and HVDC modulations using chaotic optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 170-175.
- [9] 马燕峰, 赵书强. 基于在线辨识和区域极点配置法的电力系统低频振荡协调阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 117-123.
MA Yanfeng, ZHAO Shuqiang. Coordinated damping control of power systems low-frequency oscillation based on on-line identification and region poles assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 117-123.

- [10] 王德意, 闫伟, 邱锦东, 等. 基于遗传算法的电力系统稳定器参数优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 59-63.
WANG Deyi, YAN Wei, QIU Jindong, et al. Optimization of PSS parameters based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(3): 59-63.
- [11] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [12] 袁野, 程林, 孙元章, 等. 基于系统留数矩阵的广域PSS设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 1-6.
YUAN Ye, CHENG Lin, SHUN Yuanzhang, et al. Wide area PSS design based on system residue matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 1-6.
- [13] 孙元章, 肖锋, 袁野, 等. 基于留数的广域阻尼控制协调优化设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 1-7.
SUN Yuanzhang, XIAO Feng, YUAN Ye, et al. Coordinated optimization design for wide area damping control based on residue[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 1-7.
- [14] 李凌志, 赵书强, 潘云江. 多机电力系统低频振荡模式可控性可观性研究[J]. 华北电力技术, 2001(2): 4-6.
LI Lingzhi, ZHAO Shuqiang, PAN Yunjiang. Research on controllability and observability of LF oscillation modes in multi-unit power system[J]. North China Electric Power, 2001(2): 4-6.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // IEEE international Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.

收稿日期: 2014-05-08; 修回日期: 2014-11-01

作者简介:

刘蔚(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统仿真分析工作; Email: liuwei3@csg.cn

赵勇(1976-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事电力系统安全稳定、交直流相互影响方面的研究。

(编辑 葛艳娜)